

Modellierung und Prognose der Bodenfeuchtigkeit mithilfe von Boden und Meteodaten am Beispiel einer Lysimeteranlage

Masterarbeit

von

Valerio Volpe

14. Februar 2019

Studiengang Umwelt und Natürliche Ressourcen

Fachkorrektoren:

Dr. Luzius Jean Petit Matile

ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen Wädenswil

Fachstelle Bodenökologie

Dr. Beatrice Kulli-Honauer

ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen Wädenswil

Fachstelle Bodenökologie

Impressum

Schlagworte:

Lysimeter, HYDRUS-1D, Bodenwasserbilanz, Evapotranspiration, Bodenökologie

Zitiervorschlag:

Volpe, Valerio (2019), Modellierung und Prognose der Bodenfeuchtigkeit mithilfe von Boden und Meteodaten am Beispiel einer Lysimeteranlage

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Grüntal, Postfach
CH-8820 Wädenswil

Zusammenfassung

Böden bilden einen wichtigen Zwischenspeicher im Wasserkreislauf. Das Wasser, welches im Boden in Grob und Feinporen vorliegt, dient als Lösungsmittel und Transportmedium für Nährstoffe und wird beim Gasaustausch mit der Atmosphäre transpiriert. So verändert sich der im Boden befindende Bodenwasservorrat ständig, abhängig von Niederschlägen, Transpiration und Evaporation. Die Quantifizierung des Bodenwasservorrats ist für die Landwirtschaft wichtig, weil es Hinweise zur mengenmässigen und zeitlichen Bemessung von Bewässerungsgaben liefert.

Da die flächendeckende Messung von Bodenwassergehalt und Matrixpotenzial teuer und arbeitsaufwändig ist, kann mithilfe von Modellen die Bodenwasserbilanz eines Standorts berechnet werden. Dabei werden Daten zu Meteorologie und Bodenbeschaffenheit verwendet, um die Evapotranspiration (ET), Infiltration und Versickerung mathematisch zu beziffern. In dieser Arbeit sollen Berechnungen der Wasserbilanz sowie des Bodenwassergehalts vorgenommen und mit Messdaten der Lysimeteranlage auf dem Campus der ZHAW in Wädenswil verglichen werden. Da die Exposition und Hangneigung aufgrund des sich verändernden Einstrahlungswinkels einen Einfluss auf die Evapotranspiration hat, wurden zudem Tensiometer zur Überwachung der Bodenfeuchtigkeit an zwei unterschiedlich exponierten Flächen installiert, um diesen Effekt zu beobachten.

Die mit HYDRUS-1D berechneten Komponenten der Wasserbilanz sowie Bodenwassergehalt und Matrixpotenzial zeigten eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Daten. Sickerwassermenge und Speicheränderung konnten gut nachvollzogen werden. Die Berechnung der ET wies jedoch Unstimmigkeiten auf, die teilweise durch die verwendeten Eingangs-Parameter erklärt werden konnten. Die Berechnungen des Matrixpotenzials in Abhängigkeit der expositionsabhängigen Einstrahlung konnte nur bedingt die gemessenen Werte abbilden. Im Unterboden wurde dabei eine bessere Übereinstimmung als im Oberboden erreicht. Die Genauigkeit des Modells könnte durch die Verwendung genauerer Daten über Boden und Vegetation verbessert werden.

Abstract

Soils form an important intermediate reservoir in the water cycle. The water, which is present in the soils coarse and fine pores, serves as a solvent and transport medium for nutrients and is transpired during gas exchange with the atmosphere. The soil water supply changes constantly depending on precipitation, transpiration and evaporation. Quantifying the soil water provides information on the quantity and timing of irrigation for agricultural crops.

Since the large-scale measurement of soil water content and matrix potential is expensive and labour-intensive, models can be used to calculate the soil water balance of a site. Data on meteorology and soil composition are used to mathematically quantify evapotranspiration, infiltration and percolation. In this work, calculations of the water balance and the soil water content will be carried out and compared with measured data from the lysimeter facility on the campus of the ZHAW in Wädenswil. Since exposition and slope have an influence on evapotranspiration due to the changing irradiation angle, tensiometers for monitoring soil moisture were also installed on two differently exposed surfaces to observe this effect.

The components of the water balance, soil water content and matrix potential calculated by HYDRUS-1D showed a good agreement with the measured data. The quantity of percolated and the change in stored water could be reproduced. However, the calculation of the evapotranspiration showed discrepancies, which could partly be explained by the input parameters used. The calculations of the matrix potential as a function of the exposure-dependent irradiation could only reproduce the measured values to a limited extent. A better agreement was achieved in the subsoil than in the topsoil. The performance of the model could be improved by using more accurate data regarding soil and vegetation cover.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theorieteil	1
2.1	Modellierung bodenphysikalischer Prozesse	1
2.2	Modellierung der Evapotranspiration	2
2.3	Lysimeter	2
3	Material und Methoden	3
3.1	Lysimeteranlage.....	3
3.1.1	Bodenkenndaten	4
3.1.2	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit	4
3.2	Wetterdaten	5
3.2.1	Überprüfung der Meteodaten.....	5
3.2.2	Hellmann-Regenmesser.....	6
3.3	Einfluss der Hangneigung	6
3.4	Modellparametrisierung.....	6
3.4.1	Modell der hydraulischen Bodeneigenschaften.....	7
3.4.2	Randbedingungen (« <i>Boundary Conditions</i> »).....	7
3.4.3	Anfangsbedingungen	8
3.4.4	Wasseraufnahme.....	8
3.4.5	Meteorologische Parameter.....	8
3.4.6	Angaben zum Bewuchs und Blattflächenindex	8
3.5	Expositionsabhängige Einstrahlung	9
4	Resultate.....	10
4.1	Lysimeter - Niederschlagsdaten	10
4.2	Evapotranspiration	11
4.3	Sickerwassermenge	12
4.4	Speicheränderung (ΔS)	13
4.5	Bodenwassergehalt und Matrixpotential.....	13
4.5.1	Lysimeter-Sensoren.....	13
4.5.2	Einfluss der Exposition auf das Matrixpotenzial.....	14
5	Diskussion	15
5.1	Niederschlagsmenge	15
5.2	Evapotranspiration	15
5.3	Sickerwassermenge und Speicherveränderung	16
5.4	Bodenwassergehalt	17
5.5	Neigung und Exposition.....	17
6	Fazit und Ausblick	17

1 Einleitung

In der Schweiz werden laut Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) schätzungsweise 38'000 bis 55'000 Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche mehr oder weniger regelmässig bewässert (Weber & Schild, 2007). In Folge des Klimawandels werden in der Schweiz künftig längere Trockenperioden und somit eine vermehrte Notwendigkeit für die Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen erwartet (OcCC, 2007). Der Einsatz effizienter Bewässerungstechniken ist eine Möglichkeit, um trotz steigendem Bewässerungsbedarf Grundwasser und Oberflächengewässer zu schonen. Um eine effiziente Bewässerung gewährleisten zu können, ist man jedoch auf Informationen zum Feuchtigkeitszustand des Bodens angewiesen. Während direkte Messungen der Bodenfeuchtigkeit die genauesten Daten liefern, ist der grossflächige Einsatz von Messegeräten jedoch teuer.

Die klimatische Wasserbilanz ist eine indirekte Methode, um die Wasserverfügbarkeit eines Standorts zu bemessen. Sie gibt an, wieviel des an einem Standort gefallen Niederschlags wieder in die Atmosphäre gelangt und wieviel im Boden verbleibt oder versickert. Die Wasserbilanz und somit die Verfügbarkeit von Feuchtigkeit im Boden eines Standorts hat eine integrative Funktion in der physischen Geographie (Legates et al., 2011). Die Bodenfeuchtigkeit wirkt sich auf diverse Prozesse wie beispielsweise Grundwasserneubildung (Ahn & Kim, 2018), Primärproduktion eines Ökosystems (Wei et al., 2018) und Entwicklung des Wetters (KanthaRao & Rakesh, 2018) aus.

Solche Bilanzen können als grobe Instrumente zur Bemessung von Bewässerungsgaben dienen. Standortfaktoren wie Bodenbeschaffenheit und der Einfluss der Topografie werden dabei jedoch meistens nicht berücksichtigt. Dies obwohl die Bodeneigenschaften wie die Bodenart und die damit zusammenhängende Porosität die nutzbare Feldkapazität – also die Menge an Wasser, welche den Pflanzen zur Verfügung steht – bestimmen. Weitere Standortfaktoren, die die Evapotranspiration (ET) entscheidend beeinflussen sind die Exposition und Hangneigung. Da die Strahlung einer der wichtigsten treibenden Faktoren für die Evaporation und Transpiration ist, bewirkt die unterschiedliche Exposition und Neigung eines Standorts und somit die unterschiedliche eintreffende Strahlungsmenge eine Erhöhung oder Verringerung der ET und beeinflusst so den Bodenwasserhaushalt (Aguilar, Herrero, & Polo, 2010; Wessolek, Roth, König, & Renger, 1994).

Die vorliegende Arbeit soll der Frage nachgehen, inwiefern sich mit einfach zu messenden Bodenkenndaten, Meteorologischen sowie Informationen zum Bewuchs mit einem Modell die im Boden herrschende Feuchtigkeit und Wasserbilanz nachbilden lassen. Weiter soll beurteilt werden, ob der Einfluss von Exposition und Neigung auf die ET auf dieselbe Weise nachvollzogen werden kann. Als Vergleichswerte dienen Messdaten einer Lysimeteranlage sowie von Tensiometern.

Die Forschungsfrage, welcher dieser Arbeit zugrunde liegt, lautet: *«Lässt sich die Bodenfeuchtigkeit anhand von einfach zu messenden Grössen zu Boden, Bewuchs, Meteorologie und Topografie modellieren?»*

2 Theorieteil

2.1 Modellierung bodenphysikalischer Prozesse

Modelle sind etablierte Werkzeuge, um bodenphysikalische Prozesse zu untersuchen. Sie helfen, die komplexen Zusammenhänge des Systems Boden quantifizierbar zu machen. Modelle zur Beschreibung der Funktionen und Prozesse im Boden, beispielsweise den Wasser- und Nährstofftransport, Bodenbildung oder Erosion finden Anwendung in Wissenschaft und Praxis (Vereecken et al., 2016). Eine wichtige Grundlage vieler Modelle, die sich mit hydrologischen Fragestellungen beschäftigen, wurde von Richards (1931) beigetragen. Die Richards-Gleichung beschreibt die Sickerströmung eines Fluids in einer porösen Matrix.

Sie wird deshalb oft für die Beschreibung der Versickerung von Wasser im Boden hinzugezogen (Šimůnek, Jarvis, van Genuchten, & Gärdenäs, 2003).

Regressionsmodelle, welche auf empirisch erhobenen Messdaten basieren und zur Herleitung von schwierig direkt messbaren Grössen dienen, werden Pedotransferfunktionen (PTF) genannt. Mit PTFs lassen sich beispielsweise mechanische Prozesse wie die Schrumpfung tonhaltiger Böden (Baumgartl & Kock, 2004) oder die Auswirkung von organischem Material auf die Verdichtungstendenz (Défossez et al., 2014) nachvollziehen. Ein weiteres Einsatzgebiet von PTFs ist die Abbildung von hydrologischen Eigenschaften von Böden. Um die Desorptionskurve aus mit geringem Aufwand aufzunehmende Messgrössen herzuleiten, haben beispielsweise Vereecken et al. (1989) eine PTF entwickelt, die grosse Verbreitung in der bodenkundlichen Forschungspraxis gefunden hat. Diese basiert auf Van Genuchten's Arbeit, die sich mit der mathematischen Beschreibung der Desorptionskurve beschäftigte (Van Genuchten, 1980).

2.2 Modellierung der Evapotranspiration

Als Evapotranspiration wird der Vorgang bezeichnet, wonach Wasser durch Evaporation aus dem Boden und durch Transpiration der Pflanzen vom Boden zur Atmosphäre übergeht (Blume et al., 2010). Die Evapotranspiration ist ein wichtiger Bestandteil der Wasserbilanz eines Standortes und ist von meteorologischen Faktoren wie Einstrahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit abhängig. Zur Berechnung der ET werden diverse empirische Formeln verwendet (Calanca, Smith, Holzkämper, & Ammann, 2011). Die Methode von Penman-Monteith kombiniert die Energiebilanz- und Massenbilanz-Methoden und wurde aufgrund der guten Anwendbarkeit in vielen Klimata von der FAO als Standard übernommen. Die Methode verwendet Messdaten, die häufig von professionellen Wetterstationen aufgenommen werden, um die Referenz-Evapotranspiration ET_0 zu berechnen. Dabei handelt es sich um die Menge Wasser, die von einem geschlossenen Grasbestand von 12 cm Höhe unter guter Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit sowie der Absenz von Schaderregern evapotranspiriert wird. Diese Grösse wird dann anhand von K_c und K_s -Faktoren auf die vorhandene Kultur und mögliche abiotische Stressoren angepasst (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

2.3 Lysimeter

Lysimeter sind Geräte, welche die Beobachtung der Bewegung von Wasser im Boden ermöglichen. Sie bestehen aus einem mit Boden gefüllten Behälter, welcher mit Sensoren ausgestattet sein kann (Pütz, Fank, & Flury, 2018). Wägbare Lysimeter sind mit Waagen ausgestattet, die den Boden-Monolith in hoher zeitlicher Auflösung wägen und somit die durch Niederschlag und Evapotranspiration verursachten Gewichtsveränderung nachvollziehbar machen. Mithilfe solcher wägbarer Lysimeter kann der Wasserbedarf einer Vielzahl verschiedener Kulturen, wie zum Beispiel Gras (Doležal et al., 2018), Sonnenblumen und Reis (Tyagi, Sharma, & Luthra, 2000), Weizen (Farg, Arafat, Abd El-Wahed, & EL-Gindy, 2012) und Mais (Liu, Zhang, & Zhang, 2002), untersucht werden. So lassen sich auch die von der FAO-Penman-Monteith-Methode benötigten K_c -Faktoren berechnen. Lysimeter erlauben weiter, die Bewegung von gelösten Stoffen im Bodenwasser nachzuverfolgen (Goss & Ehlers, 2009; Pütz et al., 2018). Dadurch, dass Lysimeter die Niederschläge, Evapotranspiration und Versickerung messbar machen, erlauben sie die Berechnung von Wasserbilanzen mit hoher Genauigkeit.

Ein Nachteil von Lysimetern ist, dass die gemessenen Daten nur für den Standort der Anlage gelten. Faktoren, welche die Wasserbilanz auf grossräumigen Skalen beeinflussen – beispielsweise Hangneigung und Exposition sowie die Heterogenität von Böden – können damit nicht berücksichtigt werden. Der Einbezug von «*Remote Sensing*» Technologien hat im letzten Jahrzehnt das Berücksichtigen solcher Faktoren bei der Berechnung der ET auf regionaler Skala möglich gemacht (Charoenhirunyingsyos, Honda, Kamthonkiat, & Ines, 2011; Vanino et al., 2018; Wang et al., 2018).

3 Material und Methoden

Es wurden unterschiedliche Versuche durchgeführt, um den Verlauf der Bodenfeuchtigkeit nachzuvollziehen sowie Eingangsdaten für die Simulation und Vergleichsdaten zu erhalten. Alle Versuche fanden auf dem Campusgelände der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) in Wädenswil statt (Koordinaten: 2694069 / 1230293; 520 m.ü.M.; Jahresniederschlag ca. 1400 mm).

3.1 Lysimeteranlage

Die Lysimeteranlage umfasste zwei identische Messvorrichtungen (L1 und L2) mit einem Bodenmonolith von 1 m Tiefe und einer Oberfläche von 1 m². Der Grund des Lysimeters bestand aus einer Filterschicht. Beide Lysimeter waren mit Waagen ausgestattet, die sowohl den Abfluss als auch die Masse des Lysimeters im 10-Minuten-Intervall aufzeichneten. Das Sickerwasser gelangte nur unter Einwirkung der Schwerkraft in den Sammelbehälter.

Mit elektronischen Sensoren wurden Daten zu Matrixpotenzial und Wassergehalt im Bodenprofil gemessen und automatisch im 10-Minuten-Intervall aufgezeichnet. Die im Lysimeter eingebauten Sensoren sind in Tabelle 1 aufgelistet.



Tabelle 1: Übersicht der im Lysimeter-Monolith eingebauten Sensoren

Typ	Einbautiefe in cm	Messgrösse (Messbereich)
Tensiometer T8	15, 30, 60	Matrixpotenzial in hPa (0-850 hPa) Temperatur in °C
TDR-Sonde	5, 10, 30	Wassergehalt in % (0-100%)
Matrixpotentialsensor	15, 30	Matrixpotenzial in hPa (90 - 1000000 hPa) Temperatur in °C

Abbildung 1: Übersichtskarte mit dem Standort der Lysimeter-Anlage und den Meteostationen

Die Lysimeter-Daten weisen aufgrund der hohen Auflösung ein Messrauschen auf, welches zum Beispiel durch starken Wind verstärkt wird. Um die Gewichts-Daten des Lysimeters von diesem Rauschen zu bereinigen, wurde der von Peters et al. entwickelte AWAT-Filter angewandt. Dabei handelt es sich um einen adaptiven Filter, der die Stärke der Glättung der Signalstärke anpasst (Peters, Nehls, Schonsky, & Wessolek, 2013).

Als zweite Auswertungsmethode wurden die Daten durch die Berechnung des gleitenden Mittelwerts mit einem Zeitfenster von 50 Minuten (= 5 Datenpunkte) geglättet. Für die Berechnung des Niederschlags und ET wurden aus diesen Daten dann Halbtagesdaten gewonnen, indem die Differenz der Lysimeter-Masse im 12-Stunden-Intervall berechnet wurde. Für die Sickerwasser/Drainage-Menge wurde - um die Entleerungen des Messbehälters aus den Daten zu entfernen - die Differenz im 5-Minuten-Intervall berechnet und die positiven Veränderungen der Masse in Halbtagesdaten zusammengefasst.

Die ET und der Niederschlag wurden mit beiden Methoden folgendermassen berechnet:

$$\Delta M_{\text{tot}} = \Delta M_{\text{Lysimeter}} + \Delta M_{\text{Drainage}}$$

$$\Delta M_{\text{tot}} < 0 \rightarrow \text{ET}$$

$$\Delta M_{\text{tot}} \geq 0 \rightarrow \text{N}$$

Die Hauptkomponenten der Wasserbilanz im Lysimeter sind Niederschlag (N), Evapotranspiration (ET), Drainage (D) und die Veränderung des Wassergehalts im Boden (ΔS).

$$N - ET - D - \Delta S = 0$$

Die Komponenten N, ET, D, ΔS wurden durch die messbaren Lysimeter aufgezeichnet. Die Niederschlagsmenge wurde zusätzlich von Wetterstationen von MeteoSchweiz (WAE) und Agrometeo (Obstbau) gemessen, welche als Vergleichswert dienten. Grössen wie Oberflächenabfluss und kapillarer Aufstieg aus tieferen Bodenschichten sind aufgrund des Aufbaus des Lysimeters nicht von Bedeutung.

3.1.1 Bodenkenndaten

Die Lysimeter-Monolithe wurden als ungestörte Kerne aus am Standort vorliegendem, gewachsenem Boden ausgestochen. Die Bodenkenndaten für die PTFs wurden von den Angaben zu den Bodeneigenschaften am Standort der ca. 250 Meter entfernten Bodenfeuchte-Messstation der Fachstelle Bodenschutz am Standort Wädenswil bezogen. Beim Boden am Standort handelte es sich um eine «mässig tiefgründige, schwach pseudogleyige, schwach gleyige saure Braunerde» (Bodenfeuchte Ostschweiz, 2017). Aufgrund der geographischen Nähe wird davon ausgegangen, dass der im Lysimeter vorliegende Boden vergleichbare Eigenschaften aufweist.

Tabelle 2: Korngrössenverteilung und Lagerungsdichte des Bodens am Untersuchungsort

Horizont	Tiefe in cm	Sand %	Schluff %	Ton %	Organische Substanz %	Lagerungsdichte gcm^{-3}
A	0-33	46.6	33.4	20.0	1.7	1.36
B	33-46	47.7	34.4	17.9	0.7	1.53
Bg	46-100	33.0	43.4	23.6	0.2	1.61

3.1.2 Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit

Die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens wurde mit einem Infiltrometer (Mariottesche Flasche) dreifach gemessen (Reynolds & Elrick, 2002). Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_{sat} wurde dann anhand der Formel von Elrick et al. (1989) mit $\alpha^* = 0.12$ berechnet.

Tabelle 3: Messresultate hydraulische Leitfähigkeit K_{sat}

Messung	K_{sat} in m s^{-1} ($\text{p}K_{\text{sat}}$)
1	8.12E-07 (6.1)
2	3.66E-06 (5.4)
3	2.24E-06 (5.6)
Mittelwert	2.24E-06 (5.6)



Abbildung 2: Apparate zur Messung der hydraulischen Leitfähigkeit am Standort der Untersuchungen. Im Hintergrund die Lysimeter-Anlage

3.2 Wetterdaten

Für die Untersuchungen wurden die täglichen Wetterdaten der MeteoSchweiz-Station Wädenswil (WAE) im Zeitraum vom 01. Januar bis 31. Oktober 2018 verwendet. Es wurden die Messwerte zu Niederschlag, Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchtigkeit, Globalstrahlung und Sonnenscheindauer verwendet. Die Daten wurden von MeteoSchweiz, dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, zur Verfügung gestellt. Als Vergleichsdaten zur Validierung wurden die Daten der drei Agrometeo-Stationen «Obstbau», «Au» und «Weinbau» am Standort Wädenswil verwendet (Abbildung 1).

3.2.1 Überprüfung der Meteodaten

Wenn nicht anders erwähnt, wurden jeweils die Werte der MeteoSchweiz-Station «Wädenswil» und der Agrometeo-Station «Wädenswil Obstbau» verglichen. Die Wetterdaten der Meteo-Stationen von MeteoSchweiz und Agrometeo zeigten allgemein eine gute Übereinstimmung zueinander.

Einzig die Niederschlagsdaten wiesen einige Unstimmigkeiten auf, wobei die Übereinstimmung vor allem im Bereich geringer Niederschlagsmengen schlechter wurde. Die zu Tagesdaten zusammengefassten Werte zeigten zudem eine bessere Übereinstimmung ($r = 0.91$), während die stündlichen Daten sich zum Teil stark unterschieden ($r = 0.78$) (siehe Anhang Abb. 6). Die grösste Abweichung der Niederschlagsmenge betrug 34.1 mm und wurde am 13. Juni 2018 verzeichnet.

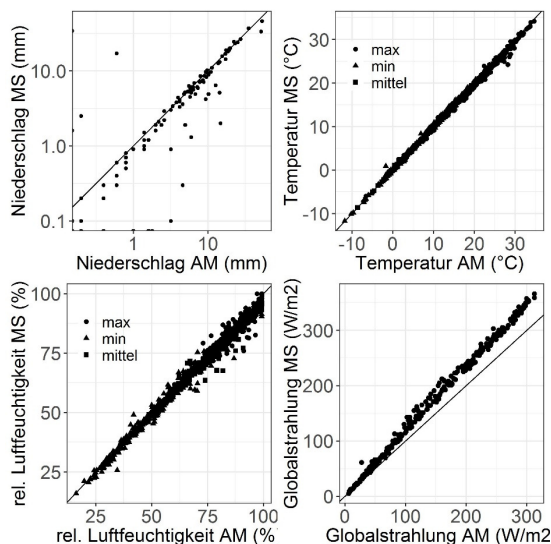


Abbildung 3: Gegenüberstellung Messdaten zu Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Globalstrahlung der MeteoSchweiz (MS) und Agrometeo (AM) Stationen

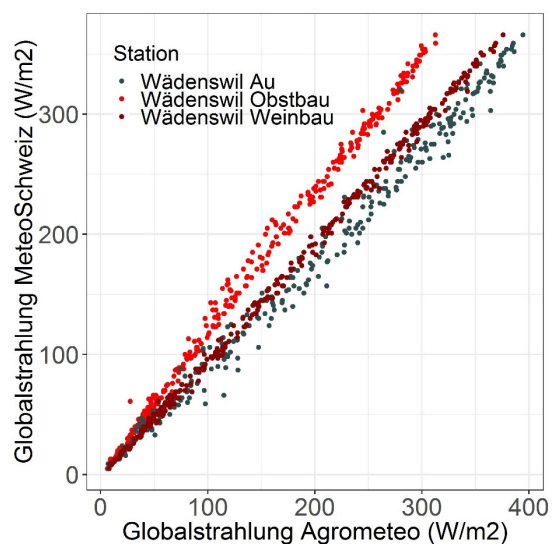


Abbildung 4: Vergleich Globalstrahlungsmesswerte Agrometeo-Stationen in Wädenswil im Vergleich zu den MeteoSchweiz Messwerten am Standort Wädenswil

An diesem Tag wurden von der Agrometeo-Station «Obstbau» keine Niederschläge registriert. Das Niederschlagsereignis wurde jedoch von der Wetterstation «Wädenswil Weinbau» aufgezeichnet, wo die Abweichung zum MeteoSchweiz Messwert nur 1.1 mm betrug. Die Übereinstimmung zu den Niederschlagsdaten der MeteoSchweiz-Station war bei der Station «Wädenswil Weinbau» allgemein leicht besser, obwohl sie rund 400 m weiter von der MeteoSchweiz-Station entfernt liegt als die Station «Wädenswil Obstbau» (siehe Abbildung 1). Grund für die Abweichungen könnten technische Störungen oder mangelhafte Wartung der Niederschlagsmesser sein.

Die Agrometeo-Station «Wädenswil Obstbau» wies generell tiefere Globalstrahlungswerte auf, als von MeteoSchweiz aufgezeichnet. Diese Station weist jedoch auch im Vergleich zu anderen Agrometeo-Stationen in Wädenswil tiefere Messwerte auf (Abbildung 4). Es kann davon ausgegangen werden, dass die MeteoSchweiz-Messwerte verlässlich sind. Es wurden daher diese Daten für die Modellierung verwendet.

3.2.2 Hellmann-Regenmesser

Um genauere Daten zu Niederschlagsereignissen zu erhalten, wurden unmittelbar neben den Lysimetern zwei Hellmann-Regenmesser aufgebaut, die jeweils nach Niederschlagsereignissen abgelesen und deren gradierte Messzylinder zusätzlich gewogen wurden. Diese Messungen fanden vom 18. Juni bis 31. Oktober 2018 statt.

Die mit dem Hellmann-Regenmesser gemessenen Niederschläge zeigten allgemein eine gute Übereinstimmung zu den Messdaten der Wetterstationen. Drei grössere Abweichungen wurden identifiziert (Abbildung 5). Diese Abweichungen waren sowohl zu den Daten der MeteoSchweiz als auch zu den Agrometeo-Stationen zu finden. Die Abweichungen wurden in den HYDRUS-1D Eingangsdaten auf das Niveau des vom Hellmann-Regenmesser gemessenen Werts korrigiert.

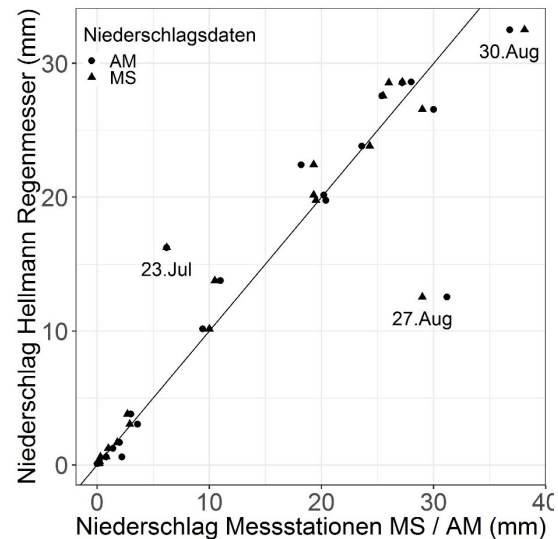


Abbildung 5: Vergleich der Niederschlagsmengen am Hellmann Regenmesser und den Messdaten der Meteo-Stationen (MS: MeteoSchweiz, AM: Agrometeo Wädenswil Obstbau) mit den drei abweichenden Datenpunkten

3.3 Einfluss der Hangneigung

Um den Einfluss der Neigung des Standorts auf den Wasserhaushalt zu bemessen, wurden zwei Delta-T DL6-Tensiometer-Logger auf zwei unterschiedlich exponierten Untersuchungsflächen eingerichtet. Die Standorte wurden so gewählt, dass die überwachten Flächen genau nach Norden und nach Osten ausgerichtet waren. Die Hangneigung war für beide Flächen ca. 16°. Beide Flächen befanden sich in unmittelbarer Nähe zur Lysimeter-Anlage. Die Logger sammelten vom 20. August bis 1. November 2018 Daten.

Die Messanordnung bestand pro Logger aus zwei Gruppen von drei Tensiometern (Typ UMS T4). Sie wurden in zwei unterschiedlichen Tiefen – 20 (Oberboden) und 40 cm (Unterboden) – eingesetzt. Für die Auswertungen wurde der Median der drei Gruppen-Messwerte verwendet. Unmittelbar neben den Tensiometern wurden jeweils drei Plantcare-Feuchtigkeits-Sensoren in den Tiefen 10, 20 und 40 cm eingesetzt. Diese Sensoren geben den Wassergehalt eines mit dem Boden in Kontakt stehenden Filzes als Angabe zwischen 0-100% an und messen zusätzlich die Temperatur im Boden.

3.4 Modellparametrisierung

Die Berechnungen zur Bodenwasserbilanz und Entwicklung der Bodenfeuchtigkeit wurden in HYDRUS-1D vorgenommen (Simunek, Sejna, Saito, Sakai, & Van Genuchten, 2009). Für die Auswertungen sowie für die Berechnungen zur expositionsabhängigen Einstrahlung wurde R-Studio verwendet (RStudio Team, 2016).

HYDRUS-1D ist eine Software, die hydrologische Prozesse im Boden mithilfe deterministischer Modelle – allen voran die Richards-Gleichung – simuliert (Simunek et al., 2009). Damit lässt sich die Wasserbewegung im Boden in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften und Umwelteinflüssen simulieren.

Es wurde in HYDRUS-1D der im Lysimeter vorliegende Bodenaufbau nachgebildet, d.h. es wurde ein Profil von 100 cm Tiefe mit 0° Neigung eingegeben. Die drei in Tabelle 2 beschriebenen Horizonte wurden mit den entsprechenden Mächtigkeiten übernommen. Das Modell wies 201 Berechnungspunkte auf, wobei die Punkte in Oberflächennähe 10-mal dichter verteilt wurden als am unteren Ende des Horizonts. Es wurden «*Observation Nodes*» für die Bodentiefen gesetzt, in welchen sich die Sensoren im Feld und in den Lysimetern befanden.

3.4.1 Modell der hydraulischen Bodeneigenschaften

Die hydraulischen Eigenschaften des Bodens wurden anhand des «*Single-Porosity*» Modells nach Van Genuchten modelliert (Van Genuchten, 1980):

$$\theta(h) = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot h)^n} \right]^m$$

$$\text{wobei } \theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

Darin ist h das Matrixpotential und θ der Wassergehalt. θ_s ist der Wassergehalt bei Sättigung und θ_r der Restwassergehalt. α , m und n sind empirische Parameter, die den Verlauf der Kurve beschreiben, wobei m als $1-1/n$ definiert ist. Es wurden drei verschiedene Parameter-Sätze für die Berechnungen verwendet. Einerseits wurden die Daten zu Bodenart und Lagerungsdichte in das in HYDRUS-1D integrierte ROSETTA-Modell eingegeben. Das ROSETTA-Modell liefert die Van-Genuchten-Parameter θ_r , θ_s , α , n sowie K_{sat} basierend auf der neuronalen Netzwerkanalyse eines über 2000 Desorptionskurven beinhaltenden Datensatzes (Schaap, Leij, & van Genuchten, 2001). Als Vergleichswerte wurden die Parameter aus der Publikation von Renger et al. (2008) und die mit der PTF von Wösten et al. (1999) erhaltenen Parameter verwendet.

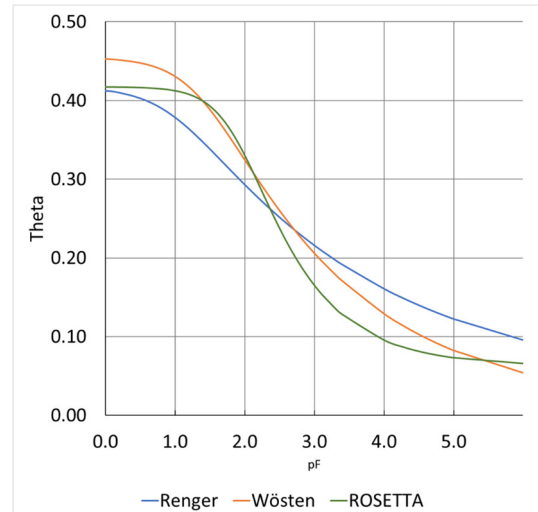


Abbildung 6: Aus den Van-Genuchten-Parametern resultierende Desorptionskurve für den Horizont «A»

Für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wurde dabei für alle drei Horizonte den gemessenen Mittelwert von 19.3 cm d^{-1} gesetzt ($pK_{sat} \ 5.6$). Der Tortuositäts-Parameter l wurde auf -1 gesetzt (Schaap & Leij, 2000).

Tabelle 4: Die in der HYDRUS-1D Simulation verwendeten Van-Genuchten-Parameter

	Horizont	θ_r	θ_s	α	n	K_{sat}	l
ROSETTA	A	0.0625	0.4175	0.0119	1.493	19.3	-1
	B	0.0536	0.3736	0.015	1.4344	19.3	-1
	Bg	0.062	0.364	0.0105	1.44	19.3	-1
Renger et al. (2008)	A	0.0337	0.4164	0.11076	1.15687	19.3	-1
	B	0.0337	0.4164	0.11076	1.15687	19.3	-1
	Bg	0.1062	0.4238	0.07743	1.2207	19.3	-1
Wösten et al. (1999)	A	0.01	0.4541778	0.0422512	1.216977	19.3	-1
	B	0.01	0.4078956	0.04076675	1.200514	19.3	-1
	Bg	0.01	0.3906762	0.0275872	1.153625	19.3	-1

3.4.2 Randbedingungen («*Boundary Conditions*»)

Für die Modellierung des Wasserhaushalts wurde als obere Randbedingung «*Atmospheric BC with Surface Run Off*» gewählt. Damit lassen sich die Niederschlagsmengen eingeben, die an der Oberfläche der modellierten Bodensäule wirken sollen. Es wurden die durch die MeteoSchweiz gemessenen Niederschlagsmengen, mit den in «3.2.2 Hellmann-Regenmesser» wählten Korrekturen, eingegeben. Als

untere Randbedingung wurde die für Lysimeter-Simulationen übliche Bedingung «*seepage face*» mit $h = 0$ gewählt. Der Fluss am Grund des Horizonts ist hierbei null, solange das Matrixpotential am untersten Berechnungspunkt negativ ist (Meurer, Prasuhn, Iden, & Durner, 2013). Dies soll den durch die Filterschicht am Lysimeterboden hervorgerufene Kapillarsperreneffekt nachbilden. Die Randbedingung «*hCritA*» wurde anhand der Formel aus der HYDRUS-1D-Anleitung für die einzelnen Tage aus der mittleren relativen Luftfeuchtigkeit berechnet.

3.4.3 Anfangsbedingungen

Um vergleichbare Anfangsbedingungen für die verschiedenen Modelle zu setzen, wurde der Wassergehalt im Boden so eingegeben, dass er an der Oberfläche $\theta_s - 0.01$ entsprach. Am Grund des Bodenprofils wurde für alle Modelle einen Wert von 0.3 eingegeben. Zwischen diesen Werten wurde der Wassergehalt linear interpoliert. Diese Verteilung entsprach etwa dem von den TDR-Sonden in den Lysimetern gemessenen Bodenwassergehalt zu Beginn der Untersuchungsperiode am 1. Januar 2018.

3.4.4 Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahme durch die Wurzeln wurde mit dem Modell von Feddes modelliert (Feddes, Kowalik, & Zaradny, 1978). Für die dazugehörigen Parameter $h1$, $h2$, $h3$ und $h4$ wurden die Grössen für Weideland aus Wesseling et al. (1991), die in der Software hinterlegt sind, übernommen. Der Parameter «*Critical Stress Index for Water Uptake*» wurde $\omega = 0$ gesetzt. So kompensierte das Modell die Wasseraufnahme bei Wasserstress durch die Aufnahme aus Wurzelbereichen mit geringerem Wasserstress.

3.4.5 Meteorologische Parameter

Die Referenz-Evapotranspiration wurde anhand der Formel von Penman-Monteith berechnet (Allen et al., 1998).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

ET_o: Referenz-Evapotranspiration [mm d⁻¹]

R_n: Nettoeinstrahlung [MJ m⁻² d⁻¹]

G: Bodenwärmefluss [MJ m⁻² d⁻¹]

γ: Psychrometrische Konstante [kPa °C⁻¹]

T: Mittlere Tageslufttemperatur auf 2 m Höhe [°C]

u₂: Windgeschwindigkeit auf 2 m Höhe [m s⁻¹]

e_s: Sättigungsdampfdruck [kPa]

e_a: Tatsächlicher Dampfdruck [kPa]

Δ: Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [kPa °C⁻¹]

Die Berechnung wurde in HYDRUS-1D anhand der täglichen Messwerte zu Strahlung, Windgeschwindigkeit, minimale und maximaler Temperatur sowie Luftfeuchtigkeit durchgeführt. Es wurden die Wetterdaten der MeteoSchweiz-Station Wädenswil (WAE) verwendet und wenn nötig in die von der Software vorgegebene Einheit umgerechnet. Die «*Cloudiness*», welche zur Berechnung der Netto-Einstrahlung benötigt wurde, wurde anhand der Sonnenscheindauer berechnet.

Die Interzeptionskonstante (Sättigungsspeicherkapazität) wird von HYDRUS-1D zur Berechnung der Interzeption anhand des Blattflächenindex (BFI) verwendet. Dieser Wert müsste experimentell für den jeweils vorliegenden Bestand gemessen werden (Braden, 1985). Als Wert für landwirtschaftliche Kulturen wird $a = 0.25$ mm vorgeschlagen. Grünland weist im Vergleich zu Kulturen wie Weizen oder Mais einen höheren Bodendeckungsgrad auf, wodurch der Wert angepasst werden muss. Von Hoyningen-Hüne bemisst die Sättigungsspeicherkapazität von Gras zwischen 1.8 - 6.2 mm (1983). Eine aktuellere Untersuchung durch Gerrits (2010) hat einen Wert von 3.1 mm ergeben. Für die Berechnungen wurde daher einen Wert von $a = 3$ mm gewählt.

3.4.6 Angaben zum Bewuchs und Blattflächenindex

Die Lysimeter waren mit einer standorttypischen Dauerwiese bewachsen, welche einen hohen Anteil an *Lolium perenne* und *Trifolium pratense* aufwies. Der Bewuchs wurde während des

Untersuchungszeitraums nur einmal – Mitte Juni 2018 – gemäht.

Die Höhe des Bewuchses wurde ab dem 1. Juni regelmässig gemessen. Dabei wurden pro Lysimeter fünf Messpunkte mit einem Doppelmeter nach der in Mosiman et al. (1999) beschriebenen Doppelmeter-Methode aufgenommen.

Die Bewuchshöhe der beiden Lysimeter war vergleichbar. Als «Crop Height» wurde für die einzelnen Messzeitpunkte zunächst der Median der Messwerte der einzelnen Lysimeter berechnet und der Mittelwert der beiden Mediane eingegeben.

Als Start- und Endhöhe des Bewuchses wurde eine Höhe von 25 cm eingegeben. Dies entspricht dem Mittelwert der letzten, am 20. August 2018 gemessenen Messwerte. HYDRUS-1D interpoliert die Höhe des Bewuchses linear zwischen zwei eingegebenen Datenpunkten. Da der Höhenzuwachs der Gräser bei Temperaturen unter 5°C minimal ist (Nagelmueller, Kirchgessner, Yates, Hiltbold, & Walter, 2016), wurde die Grashöhe am 1. April ebenfalls als 25 cm und somit als Startpunkt der Interpolation gesetzt. Die Wurzeltiefe wurde über den gesamten Zeitraum hinweg als 30 cm gesetzt. Grünland in gemässigten Breiten weist ca. 80-90% der Wurzelmasse in dieser Tiefe auf (Jackson et al., 1996).

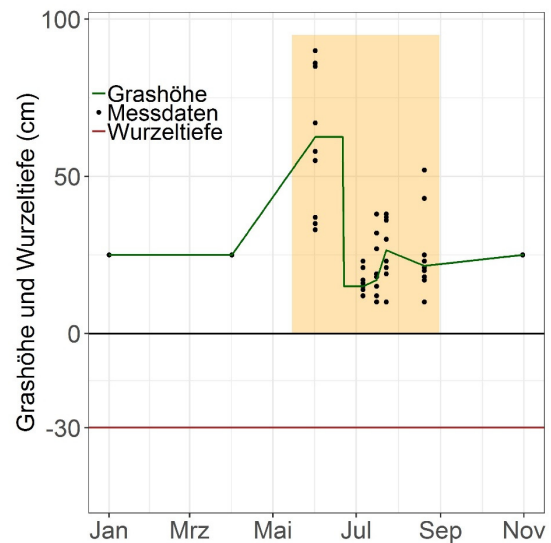


Abbildung 7: In HYDRUS-1D eingegebene mittlere Grashöhe und Wurzeltiefe; das Zeitfenster der Messungen der Grashöhe ist hervorgehoben

Nach anfänglichen Berechnungen wurde festgestellt, dass der über die Bestandeshöhe berechneten Blattflächenindex (engl. *leaf area index LAI*) durch die Software mit Höchstwerten von $BFI = 15.6 \text{ m}^2/\text{m}^2$ überschätzt wurde. Die Software verwendet für die Berechnung des BFI die Formel für Gras aus der FAO-Anleitung von Allen et al. (1998). Der Blattflächenindex wurde daraufhin so skaliert, dass der aus den Grashöhen-Messungen resultierende Höchstwert $BFI = 2 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ergab. Dieser Wert liegt im Bereich der von Asner et al. (2003) und Gilgen et al. (2009) angegebenen Werte für Grünland.

3.5 Expositionsabhängige Einstrahlung

Die von der Wetterstation gemessenen Einstrahlungswerte geben die auf eine horizontal ausgerichtete Ebene auftreffende Globalstrahlung an. Um die Einstrahlung auf die geneigten Untersuchungsflächen zu berechnen, wurde mithilfe der Funktion *calcGef* aus dem R-Paket «*solaR*» (Perpiñán, 2012) anhand der Exposition (Norden und Osten), Hangneigung (jeweils 16°), Breitengrad (47.2°) und Datum/Uhrzeit die auf die geneigten Flächen auftreffende Globalstrahlung berechnet.

Dabei wurden die Parameter *sunGeometry* = Michalsky, *iS* = 1 und *Albedo* = 0 verwendet. Die Umrechnung basiert auf Michalsky's Algorithmus (1988). Dieser verwendet die Eingangsdaten zu Breitengrad und Datum um den Einstrahlungswinkel der Sonne zur gegebenen Uhrzeit zu bestimmen. Die verwendete Funktion *calcGef* teilt zunächst die Eingangs-Globalstrahlungsdaten anhand einer Korrelationsmatrix in Diffus- und Direktstrahlung auf. Die Direktstrahlung wird dann anhand geometrischer Berechnungen transformiert, während auf die Diffusstrahlung das Modell von Hay & McKay angewandt wird (Hay & McKay, 1985). Es resultierte ein der angegebenen Exposition, Hangneigung und Breitengrad angepasster Wert für die auftreffende Globalstrahlung.

Die von der MeteoSchweiz-Station gemessenen, stündlichen Globalstrahlungsdaten mit der oben beschriebenen Funktion transformiert und danach in Tagesdurchschnittswerte zusammengefasst. Diese angepassten Strahlungswerte wurden dann in das HYDRUS-1D als meteorologische Eingangsdaten zur Berechnung der Evapotranspiration nach Penman-Monteith eingegeben.

Für die Berechnungen wurden die Van-Genuchten-Parametern gewählt, welche den Verlauf des Wassergehalts im Lysimeter am besten abbildeten. Der Berechnungszeitraum umfasste den 20. August bis 1. November 2018.

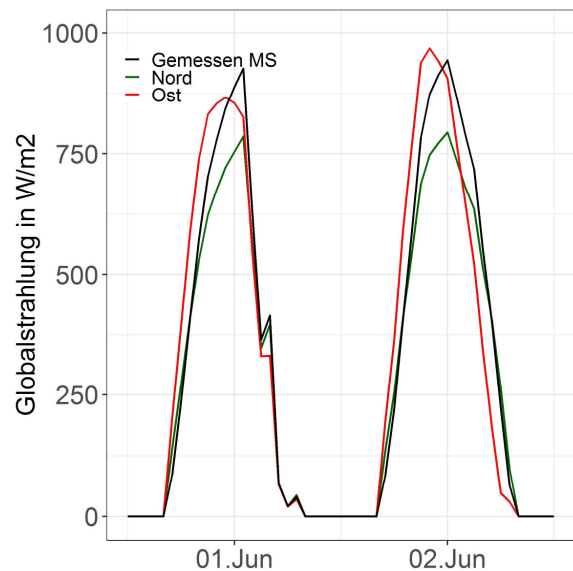


Abbildung 8: Beispiel von an der Hangneigung und Exposition angepassten stündliche Strahlungsdaten vom 1. und 2. Juni 2018

4 Resultate

4.1 Lysimeter - Niederschlagsdaten

Die Übereinstimmung zwischen den vom AWAT-Filter berechneten und des durch MeteoSchweiz gemessenen Niederschlags war mässig. Die AWAT-Daten überschätzten den Niederschlag in den meisten Fällen nur geringfügig. Problematisch war jedoch, dass an vielen Tagen, an denen durch MeteoSchweiz keine Niederschläge verzeichnet wurden, in den Daten des AWAT-Filters zum Teil bedeutende Niederschläge bis über 10 mm resultierten (Abbildung 9 links).

Die Niederschlagsdaten besser abbilden konnte der Ansatz, der auf der Berechnung der Gewichtsveränderung des Lysimeters in einem 12-Stunden Intervall basierte. Hier konnte die Übereinstimmung mit den Meteodaten von MeteoSchweiz erheblich verbessert werden (Abbildung 9 rechts). Die nachfolgenden Analysen wurden daher mit diesen Daten zu Niederschlag, Evapotranspiration und Sickerwasser durchgeführt.

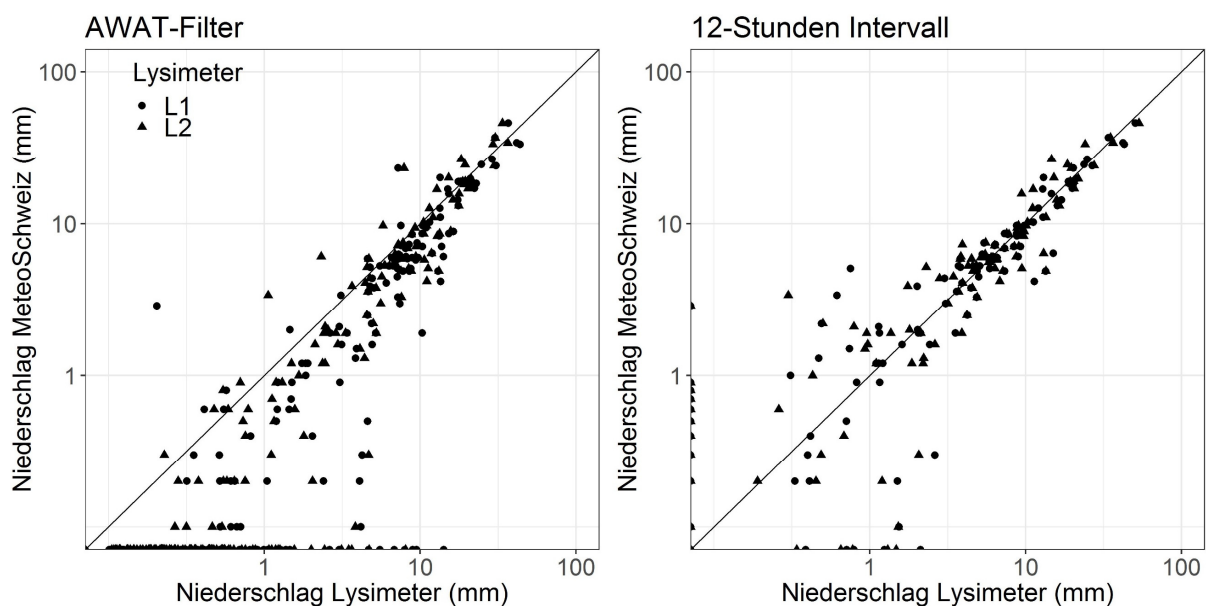


Abbildung 9: Gegenüberstellung von durch den AWAT-Filter bzw. 12-Stunden Intervall berechneten Niederschlag und Niederschlags-Messwerte der MeteoSchweiz-Station

Die kumulierten Niederschlagswerte der Lysimeter im Zeitraum vom 1. Jan 2018 bis zum 1. Nov 2018 zeigten einen ähnlichen Verlauf wie die Daten der Messtationen (Abbildung 10). Die grössten Abweichungen waren im Vergleich zu den Agrometeo-Daten in den Monaten April und Mai vorhanden. Die MeteoSchweiz-Daten wiesen weit geringere Abweichungen zu den Lysimeter-Messwerten auf.

Die Abweichung zwischen den Kurvenverläufen der beiden Lysimeter L1 und L2 war auf ein einzelnes Niederschlagsereignis am 23. Januar zurückzuführen.

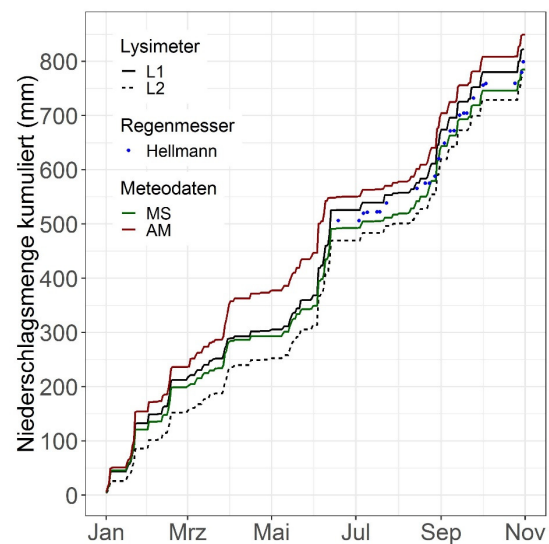


Abbildung 10: Kumulierter Niederschlag im Verlauf der Untersuchungsperiode. Die Messdaten der Hellmann-Regenmesser wurden zu den MeteoSchweiz Daten addiert.

4.2 Evapotranspiration

Die Angaben zur ET zeigten zwischen den beiden Lysimetern L1 und L2 eine sehr gute Übereinstimmung (Pearson's $r = 0.97$). Die mittlere Abweichung der einzelnen Tageswerte betrug 0.07 mm. Aufgrund dieser guten Übereinstimmung werden die folgenden Grafiken zur besseren Lesbarkeit nur die Daten zu L1 abbilden.

In Abbildung 11 sind die Differenzen zwischen den von HYDRUS-1D modellierten und den aus den Massenveränderungen der Lysimeter gemessenen ET-Werten aufgeführt. Positive Werte geben die Tage an, an denen ET L grösser als der modellierte Wert resultierte.

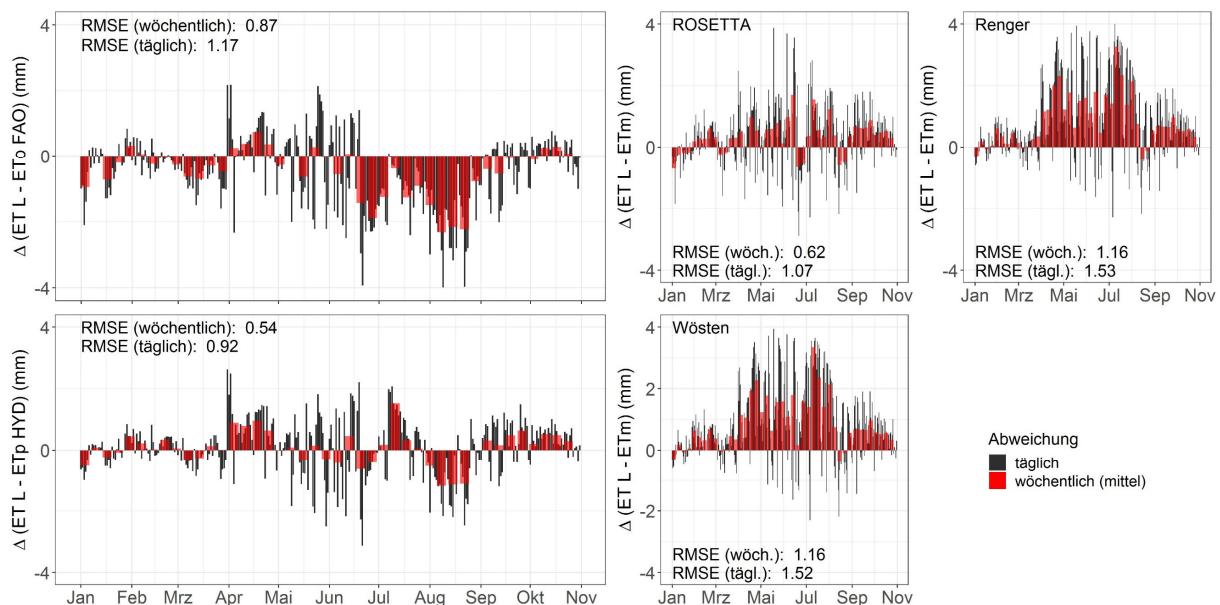


Abbildung 11: Abweichungen und RSME (mm) der vom Lysimeter gemessenen ET (ET_L) und den modellierten ET-Werten (ET_M). ET_0 FAO: Referenzevapotranspiration nach FAO-Methode; ET_p HYD: Durch HYDRUS-1D berechnete ET, mit Berücksichtigung der Bestandeshöhe; ET_m : Durch HYDRUS-1D berechnete ET unter Einbezug der Bodenfeuchtigkeit und Bestandeshöhe.

Die Abweichung der Lysimeter-ET zur FAO-Referenz-Evapotranspiration (ET_0) war vor allem in den Monaten Juli bis September gross (Abbildung 11 links oben). Dies ist insbesondere aus der mittleren wöchentlichen Abweichung gut erkennbar.

HYDRUS-1D berechnet die ET_p indem auch die Höhe der Kultur für die Berechnung des aerodynamischen Widerstands im atmosphärischen Term der Penman-Monteith Formel miteinbezieht (Abbildung 11 links unten). Die aus dieser Berechnung resultierenden Werte stellen also die Referenz-ET, angepasst an der eingegebenen Bewuchshöhe, dar. Der RMSE von 0.54 mm zeigt, dass eine gute Übereinstimmung zwischen dem vom HYDRUS-1D berechneten ET und den Lysimeter-Daten bestand. Dies obwohl es sich dabei nur um die maximal mögliche ET handelt, ohne Berücksichtigung des Bodenfeuchte-Zustands.

Die mit den drei verschiedenen Modellen berechnete, tatsächliche ET (ET_m) zeigt teils erhebliche Abweichungen zu den Lysimeter-Daten. Dabei zeigte die Berechnung mit den ROSETTA-Parametern die beste Übereinstimmung, wobei der RMSE der wöchentlichen Mittewerte noch 0.63 mm betrug. Die Kurven der kumulierten ET über den Untersuchungszeitraum zeigen ein ähnliches Bild (Abbildung 12).

Es zeigt sich, dass die Modelle die ET teils erheblich unterschätzten. Der Verlauf der Kurven zeigte jedoch eine gute Übereinstimmung des Kurvenverlaufs zu den Lysimeter-Daten, einzig die absoluten Werte waren geringer.

4.3 Sickerwassermenge

Die Versickerungsmenge der beiden Lysimeter zeigte Abweichungen, welche teils erheblich waren. So betrug die maximal gemessene Versickerungsmenge am 22. Januar 2018 bei L1 mit 43 mm fast das doppelte wie bei L2. L1 zeigte vor allem im Zeitraum zwischen Januar und April höhere Sickerwassermengen. Am 31. März und am 13. Juni wurden hingegen bei L2 Spitzen gemessen, die von L1 nur als kleines Signal registriert wurden (siehe Anhang Abb. 2).

Diese Diskrepanzen lassen auch die kumulierte Sickerwassermenge erheblich abweichen. Es resultiert eine Differenz am Ende der Untersuchungsperiode von 59 mm, welche hauptsächlich auf den grösseren Versickerungsmengen bei L1 im Januar zurückzuführen sind.

Die von HYDRUS-1D berechneten Sickerwassermengen liegen im Bereich der gemessenen Werte, wobei der genaue Verlauf der Kurven sich jedoch unterscheidet. Die mit den ROSETTA-Parametern berechnete Sickerwassermenge kommt am Ende der Untersuchungsperiode nahe am Messwert von L1 zu liegen.

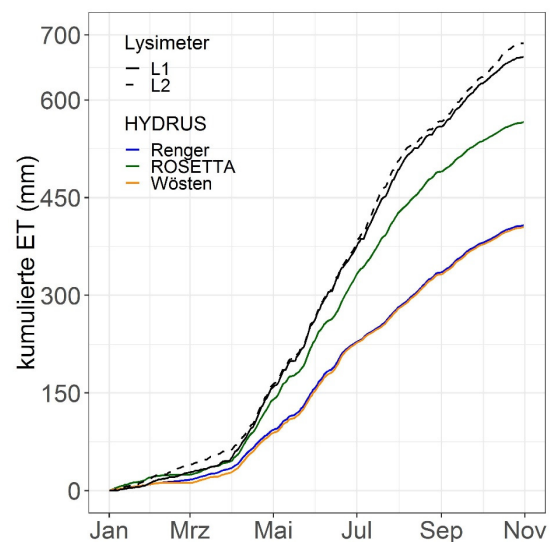


Abbildung 12: Modellierter und gemessener kumulierter Evapotranspiration über den Untersuchungszeitraum vom 1. Jan bis 1. Nov 2018

Tabelle 5: Kumulierte ET, gemessen und modelliert und Abweichung zu ETL1

	Kumulierte ET (mm)	Abweichung zu L1 (mm)
L1	666.45	0
L2	687.15	+20.7
Renger	407.81	-258.87
ROSETTA	566.01	-100.44
Wösten	405.04	-261.41

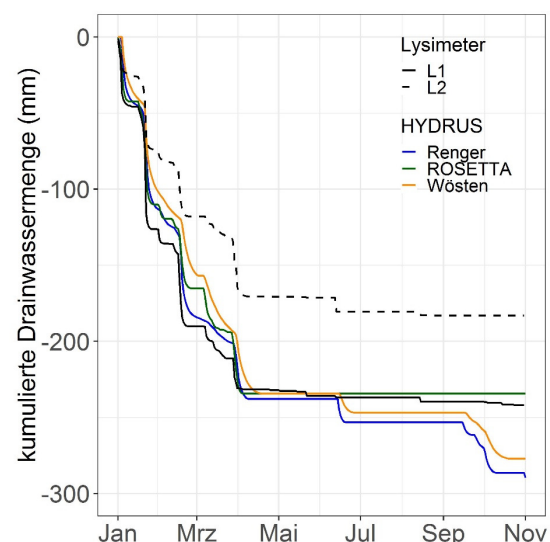


Abbildung 13: Verlauf der modellierten und gemessenen kumulierten Sickerwassermenge vom 1. Jan bis 1. Nov 2018

4.4 Speicheränderung (ΔS)

Der Verlauf der Veränderung des Bodenwasserspeichers der beiden Lysimeter zeigte einen ähnlichen Verlauf mit nur geringen Differenzen.

Die berechneten Daten hingegen wiesen grosse Abweichungen zu den Messdaten auf. Einzig die mit den ROSETTA-Parametern berechnete Kurve stimmte gut mit den Lysimeter-Daten überein. Die Daten stimmten dabei besonders dann gut überein, wenn die Änderungen ab 1. April 2018 berechnet wurden. Die beiden anderen Modelle zeigten zwar zu Beginn noch einen ähnlichen Verlauf, waren ab Mitte Juni jedoch nicht mehr in der Lage, der abnehmende Bodenwasservorrat im Lysimeter nachzubilden.

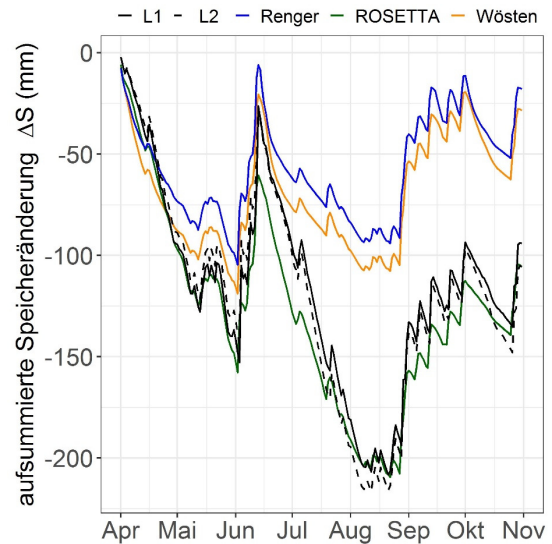


Abbildung 14: Aufsummierte Werte der Speicheränderung im Zeitraum von 1. April bis 1. November 2018

4.5 Bodenwassergehalt und Matrixpotential

4.5.1 Lysimeter-Sensoren

Die Daten der Tensiometer in den Lysimetern konnten nicht ausgewertet werden, da sich die Geräte als defekt herausstellten oder im Verlauf des Untersuchungszeitraums trockenliefen (siehe Anhang Abb. 5). Die von den MPS gelieferten Daten wiesen Minimalwerte von bis zu -20000 hPa in 30 cm Tiefe auf, wobei die Messwerte zwischen den beiden Lysimeter sehr grosse Unterschiede aufwiesen (siehe Anhang Abb. 4). Diese grosse Differenz und die tiefen Messwerte lassen darauf schliessen, dass hier ebenfalls ein Messfehler vorliegen muss. Für die Auswertungen wurden also nur die Wassergehaltsangaben der TDR-Sonden verwendet.

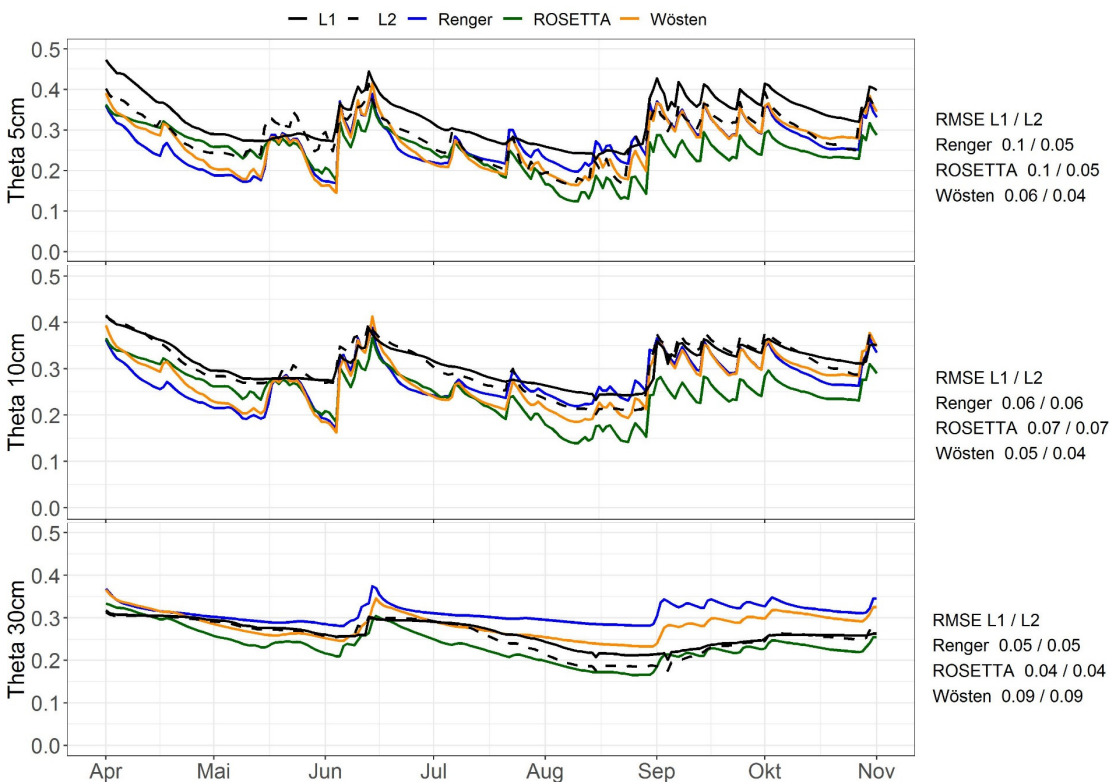


Abbildung 15: Verlauf des Bodenwassergehalts in 5, 10 und 30cm Bodentiefe vom 1. April bis 1. Nov 2018, durch die TDR-Sonden gemessen und mit HYDRUS-1D modelliert. Die RMSE-Werte sind in Bezug auf die gemessenen Werte von L1 und L2 angegeben.

Weil es mit HYDRUS-1D nicht möglich ist, das Frieren und Auftauen vom Bodenwasser nachzubilden, wurde die Berechnungen zum Bodenwassergehalt mit dem Startdatum 1. April 2018 durchgeführt.

Auffällig bei den Messdaten der Lysimeter ist die grosse Differenz zwischen L1 und L2 in der Tiefe von 5 cm. Hier ist der Wassergehalt von L1 fast über die gesamte Untersuchungsperiode um rund 5% höher als bei L2. In den tieferen Bodenschichten verlaufen die Kurven ähnlicher.

Die RMSE-Werte des Modells mit den Parametern aus Wösten et al. (1999) waren generell am tiefsten. Dies in allen drei verglichenen Bodentiefen. Die Abweichung ist jedoch mit bis zu 7% BWG in 5 cm Tiefe relativ hoch. Die berechneten Kurven zeigen zudem eine grössere Amplitude der Veränderungen bei Niederschlagsereignissen als die Messwerte. Besonders ausgeprägt ist dies im Kurvenverlauf ich 30 cm Tiefe zu sehen, wo die Messwerte sich über die gesamte Messperiode hinweg kaum verändern.

4.5.2 Einfluss der Exposition auf das Matrixpotenzial

Die Matrixpotentialmessungen am nach Osten Standort ausgerichteten zeigten eine raschere Abnahme des Matrixpotentials nach Niederschlägen als am nördlichen Standort (Abbildung 16). Es wurden auch negativere Werte erreicht als im nach Norden exponierten Standort. Ein ähnliches Bild zeigt auch die Tagesmittel-Bodentemperatur. Der Temperaturunterschied betrug nur wenige Grad Celsius, wobei die Differenz auch in 40 cm Tiefe noch messbar war (siehe Anhang Abb. 1).

HYDRUS-1D konnte den Verlauf des Matrixpotentials nur grob nachvollziehen. Am besten war die Übereinstimmung im Oberboden des nach Norden exponierten Standorts. Die starke Abnahme im Oberboden des nach Osten ausgerichteten Standorts konnte nicht nachgebildet werden. Allgemein wurden die Matrixpotenziale im Unterboden besser nachgebildet als im Oberboden.

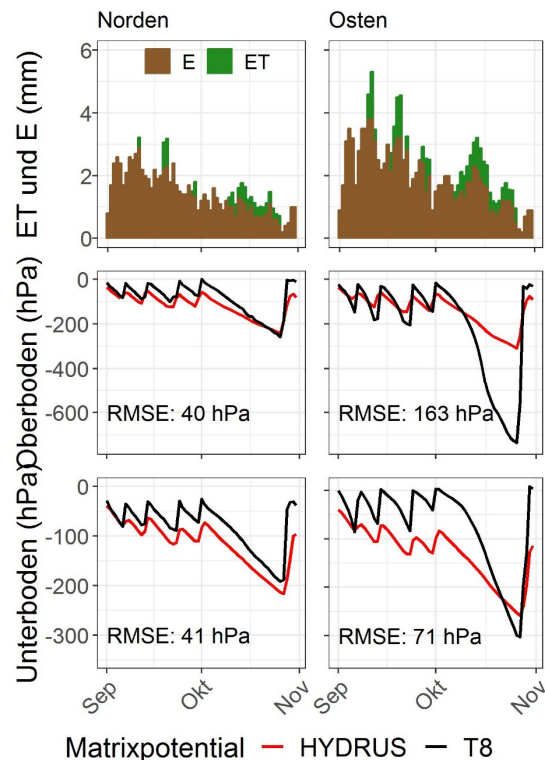


Abbildung 16: Modellierter Evapotranspiration und Evaporation sowie Vergleich von modellierten und gemessenen Matrixpotenzial an den unterschiedlich exponierten Standorten.

5 Diskussion

5.1 Niederschlagsmenge

Der Vergleich der Meteodaten der beiden Meteostationen sowie des Hellmann-Regenmessers zeigte, dass Niederschlagsmessungen auch auf kleinem Raum recht unterschiedlich ausfallen können. Die Daten der Meteostationen wiesen auch untereinander teils grosse Unterschiede auf, obwohl sie sehr nahe beieinander liegen. Dies ist besonders in Hinsicht auf Gewitterereignisse relevant, die sehr lokalisiert auftreten können. Die mit dem AWAT-Filter von Peter et al. (2013) berechneten Niederschlagsdaten zeigten nur eine schlechte Übereinstimmung mit den Messdaten von MeteoSchweiz. Dies ist möglicherweise auf die Kalibrierung der Zeitfenster und Grenzwerte des Filters zurückzuführen.

5.2 Evapotranspiration

Wird die Differenz von Lysimeter-ET und Lysimeter-Niederschlag für die Periode von Anfang April bis Ende September berechnet, ergibt sich ein Wert von -77 bis -85 mm. Dies deckt sich mit den meteorologischen Beobachtungen, die den Sommer 2018 als einer der trockensten seit Beginn der Messaufzeichnungen bezeichnen (MeteoSchweiz, 2019).

Die Gesamt-ET aus den Lysimeter-Daten zeigt dabei eine gute Übereinstimmung für typische Werte in gemässigten Breiten (Nistor, 2018). Die modellierte ETp (Abbildung 11 links unten), bei welcher der Bodenwassergehalt nicht mitberücksichtigt wird, zeigte eine gute Übereinstimmung mit den Lysimeter-ET-Daten (ET L), besonders für die wöchentlichen Mittelwerte. Dies ist erstaunlich, da der im Lysimeter vorliegende Bestand eindeutige Zeichen von Wassermangel zeigte. Nach dem Mähen Mitte Juni war zu sehen, dass ein Grossteil der Gräser braun und bereits vertrocknet war. Im Verlauf des Sommers wurde der Bewuchs noch sichtbar schwächer.

Dies hat sich jedoch nicht stark in den ET-Messungen der Lysimeter bemerkbar gemacht, wo weiter hohe ET-Tageswerte verzeichnet wurden (Abbildung 17). Möglicherweise wurde die dadurch abnehmende Transpiration durch eine erhöhte Evaporation kompensiert.

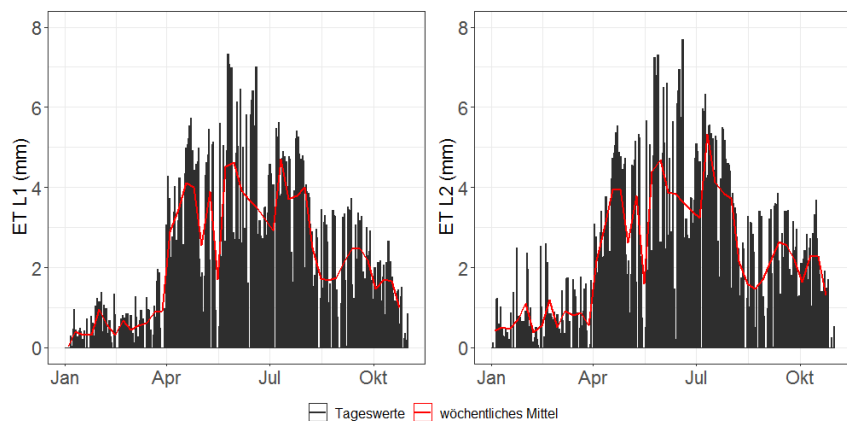


Abbildung 17: Verlauf der durch die Lysimeter gemessene ET

Die mangelhafte Übereinstimmung zwischen den mit HYDRUS-1D berechneten ETm und der Lysimeter-ET (ET L) könnte darauf zurückzuführen sein, dass ein angepasstes Wurzelwachstum in tiefere Bodenschichten als Reaktion auf das Austrocknen der oberen Bodenschicht nicht berücksichtigt wurde. Die verwendete fixe Wurzeltiefe von 30 cm berücksichtigt dabei das hydrotrophe Verhalten der Wurzeln nicht, wonach unter Wasserstress die Bildung von tiefgehenden Wurzeln auf Kosten der Seitenwurzeln gefördert wird (Pace, Cralle, El-Halawany, Cothren, & Senseman, 1999). HYDRUS-1D verfügt zwar über ein Modul zur Simulation von Wurzelwachstum, dieses kann jedoch die verminderte Durchwurzelung von ausgetrocknetem Boden nicht nachbilden. Weiter ist bekannt, dass die Penman-Monteith-Methode die ET unter ariden Verhältnissen unterschätzt (Allen et al., 1998). Es ist denkbar, dass ein solcher Effekt in den extrem trockenen Perioden während des Untersuchungszeitraums aufgetreten ist.

Die in Abbildung 18 gezeigten Unterschiede zwischen den verschiedenen ET der Modelle sind hauptsächlich auf die unterschiedlich grosse Evaporation zurückzuführen. Dies ist besonders gut Anfang Mai und Anfang Juli zu sehen (Abbildung 18). Während in den Berechnungen der Modelle «Wösten» und «Renger» die Evaporation stark zurückgeht, findet bei «ROSETTA» weiter Evaporation statt. Dies stimmt mit dem steileren Verlauf der Desorptionskurve mit den ROSETTA-Parametern überein (siehe Abbildung 6). Der Potenzial-Gradient zwischen Oberfläche und tiefen Bodenschichten, der die Wassernachlieferung antreibt, wird durch die Evaporation grösser. Die von der Bodenoberfläche evaporierende Wassermenge wird bei «ROSETTA» durch Nachlieferung aus tieferen Schichten ausgeglichen. Dies ist bei den anderen zwei Modellen nicht der Fall. Hier trocknet die Oberfläche aus, wodurch die Leitfähigkeit stark abnimmt und dadurch die Nachlieferung gestoppt wird (Blume et al., 2010). Dies lässt sich auch anhand der durch HYDRUS-1D berechneten Flüsse und Matrixpotenziale nachvollziehen (Abbildung 19).

5.3 Sickerwassermenge und Speicherveränderung

Während die Niederschläge und ET für die beiden Lysimeter sehr ähnliche Werte angaben, gab es bei der Sickerwassermenge grössere Unterschiede. Diese können die Folge von präferenzzieller Infiltration durch Schrumpfrisse sein, (Greve, Andersen, & Acworth, 2010) welche am Untersuchungsstandort in den Sommermonaten zahlreich zu beobachten waren. Nicht auszuschliessen sind zudem Unterschiede in der Wasserspeicher- und Leitfähigkeit des Bodens der beiden Lysimeter aufgrund unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit. Generell lässt sich sagen, dass sich die Komponenten der Bodenwasserbilanz am besten mit den mit «ROSETTA» erhaltenen Parametern berechnen liessen. Die gute Übereinstimmung der Sickerwassermenge sowie des Speicheränderung lassen darauf schliessen, dass die mit «ROSETTA» erhaltenen Van-Genuchten-Parameter die Desorptionskurve des Bodens in den Lysimetern hinreichend abbilden können.

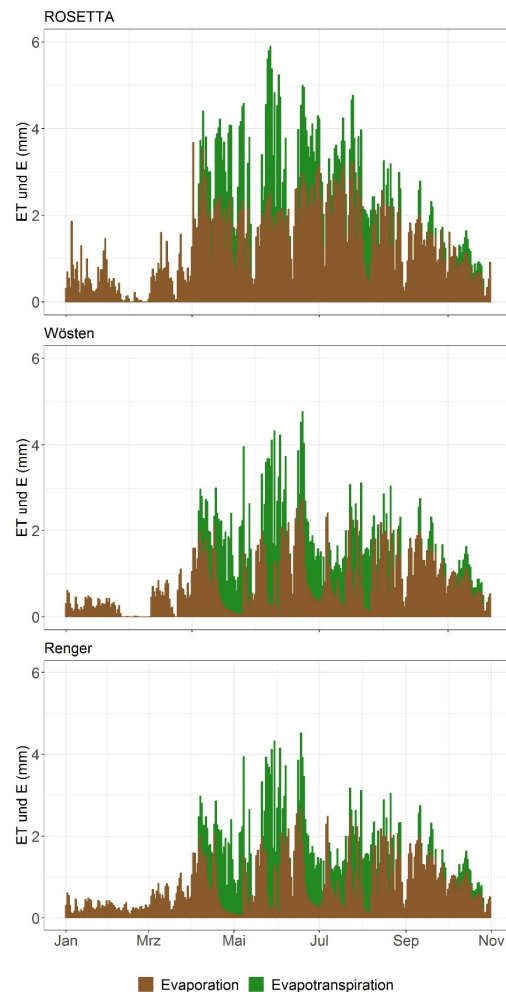


Abbildung 18: Evaporation und Evapotranspiration, Resultate der HYDRUS-1D Berechnungen

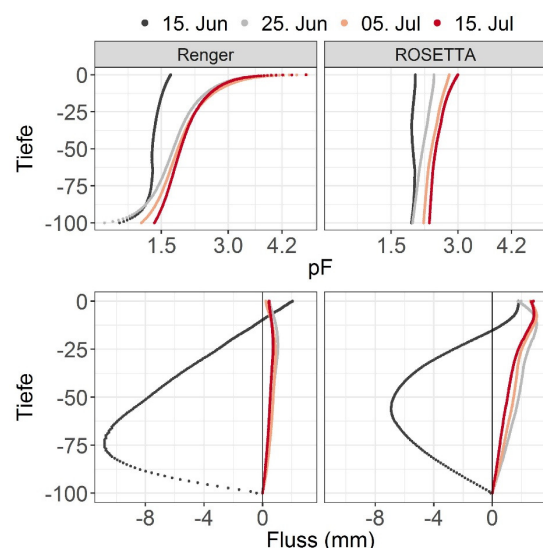


Abbildung 19: Matrixpotenzial und Flüsse aus HYDRUS-1D für den Zeitraum zwischen dem 15.6 und 15.7

5.4 Bodenwassergehalt

Der Bodenwassergehalt wurde am besten mit den Parametern aus Wösten et al. (1999) abgebildet, wobei die Abweichung zwischen den Modellen nur wenige Prozent betrug (siehe Abbildung 15). Der Messwert solcher Sensoren hängt stark von den Bodeneigenschaften unmittelbar bei den Messnadeln ab (Ghezzehei, 2008). Daher kann die Abweichung von wenigen Prozenten als ein gutes Resultat angesehen werden. Die berechneten Matrixpotenziale hingegen unterscheiden sich stärker. Die verwendeten Informationen zu Bodenart und Lagerungsdichte, die den Parametern zugrunde liegen, stammen nicht vom Boden im Lysimeter selbst. Es ist denkbar, dass mit solchen Daten vom vorliegenden Boden bessere Resultate erzielt werden könnten. Eine weitere Möglichkeit, um genauere hydraulische Parameter zu erhalten, wäre eine inverse Modellierung anhand der gemessenen Daten (Meurer et al., 2013).

Die Berechnungsergebnisse zum Bodenwassergehalt zeigten weiter eine grosse Abhängigkeit vom eingegebenen Blattflächenindex. Wurde die gemessene Grashöhe eingegeben, wurden unrealistische Wassergehalte gemessen, welche in keiner Weise mit den Messdaten übereinstimmten. Die hier angewandte Skalierung des BFI schien gute Resultate zu liefern. Noch bessere Resultate könnten mit direkten Messungen des BFI vor Ort erzielt werden. Eine Möglichkeit, um dieses Mass auch grossflächig aufnehmen zu können, wäre mit einer Auswertung von Satelliten- oder Drohnendaten (Capolupo, Kooistra, Berendonk, Lorenzo, & Suomalainen, 2015; Shen, Li, & Guo, 2014). Die zeitliche Entwicklung der Bestandeshöhe könnte alternativ mit Wachstums-Modellen berechnet werden (Calanca, Deléglise, Martin, Carrère, & Mosimann, 2016; Schapendonk, Stol, van Kraalingen, & Bouman, 1998). Dies könnte die Bestandesentwicklung genauer nachbilden als einzelne Punktmessungen. HYDRUS-1D kann statt des BFI auch den Bodendeckungsgrad für die Partitionierung der Evaporation und Transpiration verwenden. Diese Grösse liesse sich genauer abschätzen als der BFI und könnte daher zu besseren Resultaten der Berechnung führen.

5.5 Neigung und Exposition

Die Berechnungen der ET in Abhängigkeit der Neigung und Exposition zeigten nur teilweise eine Übereinstimmung mit den Messdaten. Im Oberboden wurde die Abnahme des Matrixpotenzials besonders am östlichen Standort unterschätzt. Der Einfluss der Fehlerquellen, die bereits für die Wassergehaltsberechnungen diskutiert wurden, ist hier noch grösser, weil das Matrixpotenzial exponentiell mit der Reduktion des Wassergehalts abnimmt. Auffällig ist, dass während von den Tensiometern praktisch bei jedem Niederschlagsereignis die Sättigung des Bodens gemessen wurde, die Berechnungen nie ein Matrixpotenzial von 0 erreichten. Dieses Verhalten könnte damit erklärt werden, dass die Niederschläge vorzugsweise in die Bohrung, in welche die Tensiometer eingesetzt waren, infiltrierten. Somit wurde im die Messkerze umgebenden Boden sehr rasch ein Sättigungszustand erreicht, während das Modell eine kontinuierliche, langsame Versickerung des Wassers vorsah.

6 Fazit und Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Bestandteile der Wasserbilanz sowie den Bodenwassergehalt mit HYDRUS-1D mit einer guten Übereinstimmung zu Messwerten berechnen lassen.

Die Wahl der PTF zur Herleitung der Van-Genuchten-Parameter erwies sich als entscheidend für die Übereinstimmung von Modell und Messwerte. Dass mit denselben Eingaben zu den Bodeneigenschaften so unterschiedliche Werte für die Wasserbilanzkomponenten erzielt wurden, zeigt wie stark die Herleitung der Desorptionskurve durch PTFs von Unsicherheiten behaftet ist. Die ausgesprochene Heterogenität von Böden erschwert zudem die Übertragbarkeit von Bodendaten, welche auch auf kleinsten Raum variieren können. Bodenkarten in hoher räumlicher Auflösung könnten die benötigten Daten in ausreichender Genauigkeit liefern, sind aber in der Schweiz nicht flächendeckend vorhanden. Die modellierten Werte zeigten nichtsdestotrotz eine recht gute Übereinstimmung zu den Messwerten, obwohl nur sehr grundlegende Informationen zur Bodenbeschaffenheit hinzugezogen wurden.

Die Vegetationsparameter Bewuchshöhe und Wurzeltiefe wurden in der vorliegenden Arbeit nur grob gemessen oder geschätzt, wirkten sich aber erheblich auf die modellierte Entwicklung der Bodenfeuchte aus. Eine präzisere Erfassung dieser Werte scheint sich aufzudrängen, wenn die Genauigkeit der Modellierung erhöht werden soll. Besonders die Wurzeltiefe dürfte dabei jedoch schwierig zu erfassen sein.

Die Überprüfung der Meteodaten zeigte, dass die durch die Stationen gemessenen Daten von Fehler behaftet sein können. Die Globalstrahlungswerte der Agrometeo-Station Wädenswil Obstbau zeigten beispielsweise eine systematische Abweichung vom MeteoSchweiz Messwert. Solche Fehler können nur erkannt werden, wenn Vergleichswerte von nahegelegenen Stationen vorhanden sind. Noch schwieriger wird es bei Niederschlagsdaten, welche lokal stark variieren können. Für die Modellierung des Wasserhaushalts auf regionaler Skala wäre es denkbar, die punktuellen Niederschlagsmessungen, die von den Messstationen erfasst werden, durch weitere Informationen wie zum Beispiel von Niederschlagsradars, zu vervollständigen.

Der Einfluss der Hangneigung und Exposition konnte im Modell nur bedingt nachvollzogen werden. Fraglich ist, ob hier neben der Einstrahlung weitere Faktoren die Entwicklung des Matrixpotenzials beeinflusst haben. Genauere Daten könnten hier unter kontrollierten Bedingungen, beispielsweise unter Sicherstellung eines homogenen Bewuchses, gewonnen werden. Weiter wurde in dieser Arbeit der Einfluss vom Oberflächenabfluss nicht berücksichtigt, welcher bei Starkniederschlägen eine inhomogene Infiltration bewirken kann.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse liefern Hinweise auf die Machbarkeit der Modellierung des Wasserhaushalts von Wiesen, auch mit Einbezug von Neigung und Exposition. In Anbetracht von künftig wahrscheinlich häufiger werdenden Trockenperioden und des gleichzeitig steigenden Wasserverbrauchs in der Landwirtschaft sind solche Modelle hilfreiche Instrumente, um die Effizienz von Bewässerungen zu steigern. Dies setzt jedoch verlässliche Daten zum vorliegenden Boden, der Vegetation und Meteorologie voraus.

Quellenverzeichnis

- Aguilar, C., Herrero, J., & Polo, M. J. (2010). Topographic effects on solar radiation distribution in mountainous watersheds and their influence on reference evapotranspiration estimates at watershed scale. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14(12), 2479–2494.
- Ahn, S. R., & Kim, S. J. (2018). Analysis of water balance by surface-groundwater interaction using the SWAT model for the Han River basin, South Korea. *Paddy and Water Environment*, 16(3), 543–560.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 56(97), e156.
- Asner, G. P., Scurlock, J. M. O., & Hicke, J. A. (2003). Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology*, 15.
- Baumgartl, T., & Kock, B. (2004). Modelling Volume Change and Mechanical Properties With Hydraulic Models. *ResearchGate*, 68(1), 57–65.
- Blume, H.-P., Brümmer, G., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., ... Wilke, B.-M. (2010). *Scheffer / Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde* (16. Auflage). Heidelberg: Spektrum, Akademischer Verlag.
- Bodenfeuchte Ostschweiz. (2017, July 3). Bodenfeuchte Ostschweiz - Standorte - ZH Wädenswil. Retrieved 3 July 2017, from <http://www.bodenfeuchte-ostschweiz.ch/index.php?id=85741&standortseite=bodenkennwerte>
- Braden, H. (1985). Ein Energiehaushalts- und Verdunstungsmodell für Wasser- und Stoffhaushaltsuntersuchungen landwirtschaftlich genutzter Einzugsgebiete. *Mitteilungen Der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 42, 294–299.
- Calanca, P., Deléglise, C., Martin, R., Carrère, P., & Mosimann, E. (2016). Testing the ability of a simple grassland model to simulate the seasonal effects of drought on herbage growth. *Field Crops Research*, 187, 12–23.
- Calanca, P., Smith, P., Holzkämper, A., & Ammann, C. (2011). Die Referenzverdunstung und ihre Anwendung in der Agrarmeteorologie. *AGRAR FORSCHUNG SCHWEIZ*, 176.
- Capolupo, A., Kooistra, L., Berendonk, C., Lorenzo, B., & Suomalainen, J. (2015). Estimating Plant Traits of Grasslands from UAV-Acquired Hyperspectral Images: A Comparison of Statistical Approaches. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4, 2792–2820.
- Charoenhirunyingyos, S., Honda, K., Kamthonkiat, D., & Ines, A. V. M. (2011). Soil moisture estimation from inverse modeling using multiple criteria functions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75(2), 278–287.
- Défossez, P., Richard, G., Keller, T., Adamiade, V., Govind, A., & Mary, B. (2014). Modelling the impact of declining soil organic carbon on soil compaction: Application to a cultivated Eutric Cambisol with massive straw exportation for energy production in Northern France. *Soil and Tillage Research*, 141, 44–54.
- Doležal, F., Hernandez-Gomis, R., Matula, S., Gulamov, M., Miháliková, M., & Khodjaev, S. (2018). Actual Evapotranspiration of Unirrigated Grass in a Smart Field Lysimeter. *Vadose Zone Journal*, 17(1). Retrieved from <https://dl.sciencesocieties.org/publications/vzj/abstracts/17/1/170173>
- Elrick, D. E., Reynolds, W. D., & Tan, K. A. (1989). Hydraulic Conductivity Measurements in the Unsaturated Zone Using Improved Well Analyses. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 9(3), 184–193.
- Farg, E., Arafat, S. M., Abd El-Wahed, M. S., & EL-Gindy, A. M. (2012). Estimation of Evapotranspiration ETc and Crop Coefficient Kc of Wheat, in south Nile Delta of Egypt Using integrated FAO-56 approach and remote sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 15(1), 83–89.
- Feddes, R. A., Kowalik, P. J., & Zaradny, H. (1978). *Simulation of field water use and crop yield*. Wageningen: Centre for agricultural publishing and documentation. Retrieved from <http://lib.ugent.be/catalog/rug01:000032129>
- Gerrits, A. M. J. (2010). *The role of interception in the hydrological cycle*. TU Delft, Delft. Retrieved from <http://resolver.tudelft.nl/uuid:7dd2523b-2169-4e7e-992c-365d2294d02e>
- Ghezzehei, T. A. (2008). Errors in determination of soil water content using time domain reflectometry

- caused by soil compaction around waveguides. *Water Resources Research*, 44(8).
- Gilgen, A. K., & Buchmann, N. (2009). Response of temperate grasslands at different altitudes to simulated summer drought differed but scaled with annual precipitation. *Biogeosciences*, 6(11), 2525–2539.
- Goss, M. J., & Ehlers, W. (2009). The role of lysimeters in the development of our understanding of soil water and nutrient dynamics in ecosystems. *Soil Use and Management*, 25(3), 213–223.
- Greve, A., Andersen, M. S., & Acworth, R. I. (2010). Investigations of soil cracking and preferential flow in a weighing lysimeter filled with cracking clay soil. *Journal of Hydrology*, 393(1), 105–113.
- Hay, J. E., & McKay, D. C. (1985). Estimating Solar Irradiance on Inclined Surfaces: A Review and Assessment of Methodologies. *International Journal of Solar Energy*, 3(4–5), 203–240.
- Jackson, R. B., Canadell, J., Ehleringer, J. R., Mooney, H. A., Sala, O. E., & Schulze, E. D. (1996). A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108(3), 389–411.
- KanthaRao, B., & Rakesh, V. (2018). Observational evidence for the relationship between spring soil moisture and June rainfall over the Indian region. *Theoretical and Applied Climatology*, 132(3–4), 835–849.
- Legates, D. R., Mahmood, R., Levia, D. F., DeLiberty, T. L., Quiring, S. M., Houser, C., & Nelson, F. E. (2011). Soil moisture: A central and unifying theme in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 35(1), 65–86.
- Liu, C., Zhang, X., & Zhang, Y. (2002). Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111(2), 109–120.
- MeteoSchweiz. (2019). *Klimabulletin Jahr 2018*. Zürich. Retrieved from <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klima-der-schweiz/monats-und-jahresueckblick.html>
- Meurer, K., Prasuhn, V., Iden, S., & Durner, W. (2013). Inverse Modellierung des Wassertransports in Großlysimetern der Forschungsstation Zürich-Reckenholz. In *Bericht / 15. Lysimetertagung: am 16. und 17. April 2013 am LFZ Raumberg-Gumpenstein*. Irdning: Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein.
- Michalsky, J. J. (1988). The Astronomical Almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050). *Solar Energy*, 40(3), 227–235.
- Mosimann, E., Troxler, J., Münger, A., & Vogel, R. (1999). Schätzung des Futterertrages durch Messung der Pflanzenhöhe. *AGRAR FORSCHUNG*, 6(5), 189–192.
- Nagelmueller, S., Kirchgessner, N., Yates, S., Hiltbold, M., & Walter, A. (2016). Leaf Length Tracker: a novel approach to analyse leaf elongation close to the thermal limit of growth in the field. *Journal of Experimental Botany*, 67(6), 1897–1906.
- Nistor, M. M. (2018). Seasonal And Annual Crop Evapotranspiration In Europe Over 2011-2070. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(3), 2149–2468.
- OcCC. (2007). *Klimaänderung und die Schweiz 2050: Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft*. Bern. Retrieved from http://www.occc.ch/products/ch2050/PDF_D/CH2050.pdf
- Pace, P. F., Cralle, H. T., El-Halawany, S. H. M., Cothren, J. T., & Senseman, S. A. (1999). Drought-induced Changes in Shoot and Root Growth of Young Cotton Plants. *Journal of Cotton Science*, (3), 183–187.
- Perpiñán, O. (2012). solaR: Solar Radiation and Photovoltaic Systems with R. *Journal of Statistical Software*, 50(9), 1–32.
- Peters, A., Nehls, T., Schonsky, H., & Wessolek, G. (2013). Separating precipitation and evapotranspiration from noise; a new filter routine for high resolution lysimeter data. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(12), 14645–14674.
- Pütz, T., Fank, J., & Flury, M. (2018). Lysimeters in Vadose Zone Research. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 0.
- Renger, M., Bohne, K., Facklam, M., Harrach, T., Riek, W., Schäfer, W., ... Zacharias, S. (2008). Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. Retrieved from <http://www.academia.edu/download/41462088/bodenphysikalischeKennwerte.pdf>
- Reynolds, W. D., & Elrick, D. E. (2002). Constant Head Well Permeameter (Vadose Zone). In J. H. Dane & C. G. Topp (Eds.), *Book: Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods* (pp. 844–858). Soil

- Science Society of America. Retrieved from <https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/abstracts/sssabookseries/methodsofsoilan4/844>
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318–333.
- RStudio Team. (2016). *RStudio: Integrated Development Environment for R*. Boston, MA: RStudio, Inc. Retrieved from <http://www.rstudio.com/>
- Schaap, M. G., & Leij, F. J. (2000). Improved Prediction of Unsaturated Hydraulic Conductivity with the Mualem-van Genuchten Model. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 843.
- Schaap, M. G., Leij, F. J., & van Genuchten, M. T. (2001). rosetta : a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251(3–4), 163–176.
- Schapendonk, A. H. C. M., Stol, W., van Kraalingen, D. W. G., & Bouman, B. A. M. (1998). LINGRA, a sink/source model to simulate grassland productivity in Europe. *European Journal of Agronomy*, 9(2), 87–100.
- Shen, L., Li, Z., & Guo, X. (2014). Remote Sensing of Leaf Area Index (LAI) and a Spatiotemporally Parameterized Model for Mixed Grasslands, 4(1), 16.
- Šimůnek, J., Jarvis, N. J., van Genuchten, M. T., & Gärdenäs, A. (2003). Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *Journal of Hydrology*, 272(1), 14–35.
- Simunek, J., Sejna, M., Saito, M., Sakai, M., & Van Genuchten, M. T. (2009). The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Departement of Environmental Sciences University of California Riverside. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/271515313_The_HYDRUS-1D_Software_Package_for_Simulating_the_One-Dimensional_Movement_of_Water_Heat_and_Multiple_Solutes_in_Variably-Saturated_Media
- Tyagi, N. K., Sharma, D. K., & Luthra, S. K. (2000). Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter. *Agricultural Water Management*, 45(1), 41–54.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898.
- Vanino, S., Nino, P., De Michele, C., Bolognesi, S. F., D’Urso, G., Di Bene, C., ... Napoli, R. (2018). Capability of Sentinel-2 data for estimating maximum evapotranspiration and irrigation requirements for tomato crop in Central Italy. *Remote Sensing of Environment*, 215, 452–470.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., & Darius, P. (1989). Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. *Soil Science*, 148(6), 389–403.
- Vereecken, H., Schnepf, A., Hopmans, J. W., Javaux, M., Or, D., Roose, T., ... Young, I. M. (2016). Modeling Soil Processes: Review, Key Challenges, and New Perspectives. *Vadose Zone Journal*, 15(5). Retrieved from <https://dl.sciencesocieties.org/publications/vzj/abstracts/15/5/vzj2015.09.0131>
- Von Hoyningen-Hüne, J. (1983). Die Interception des Niederschlags in landwirtschaftlichen Beständen. *Schriftenreihe Des DVWK*, 57, 1–53.
- Wang, Y., Peng, J., Song, X., Leng, P., Ludwig, R., & Loew, A. (2018). Surface Soil Moisture Retrieval Using Optical/Thermal Infrared Remote Sensing Data. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(9), 5433–5442.
- Weber, M., & Schild, A. (2007). *Stand der Bewässerung in der Schweiz, Bericht zur Umfrage 2006*. Bern: Bundesamt für Landwirtschaft BLW.
- Wei, L., Zhou, H., Link, T. E., Kavanagh, K. L., Hubbart, J. A., Du, E., ... Marshall, J. D. (2018). Forest productivity varies with soil moisture more than temperature in a small montane watershed. *Agricultural and Forest Meteorology*, 259, 211–221.
- Wesseling, J. G., Elbers, J. A., Kabat, P., & van den Broek, B. J. (1991). SWATRE: instructions for input. *Internal Note, Winand Staring Centre, Wageningen*.
- Wessolek, G., Roth, C., König, R., & Renger, M. (1994). Influence of slope and exposition on water balance of loess soils. *Zeitschrift Für Pflanzenernährung Und Bodenkunde*, 157(3), 165–173.
- Wösten, J. H. M., Lilly, A., Nemes, A., & Le Bas, C. (1999). Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90(3), 169–185.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der im Lysimeter-Monolith eingebauten Sensoren	3
Tabelle 2: Korngrößenverteilung und Lagerungsdichte des Bodens am Untersuchungsort	4
Tabelle 3: Messresultate hydraulische Leitfähigkeit K_{sat}	4
Tabelle 4: Die in der HYDRUS-1D Simulation verwendeten Van-Genuchten-Parameter	7
Tabelle 5: Kumulierte ET, gemessen und modelliert und Abweichung zu ETL1	12

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtskarte mit dem Standort der Lysimeter-Anlage und den Meteostationen.....	3
Abbildung 2: Apparate zur Messung der hydraulischen Leitfähigkeit am Standort der Untersuchungen. Im Hintergrund die Lysimeter-Anlage.....	4
Abbildung 3: Gegenüberstellung Messdaten der MeteoSchweiz (MS) und Agrometeo (AM) Station	5
Abbildung 4: Vergleich Globalstrahlungsmesswerte Agrometeo-Stationen in Wädenswil im Vergleich zu den MeteoSchweiz Messwerten am Standort Wädenswil	5
Abbildung 5: Vergleich der Niederschlagsmengen am Hellmann Regenmesser und den Messdaten der Meteo-Stationen (MS: MeteoSchweiz, AM: Agrometeo Wädenswil Obstbau) mit den drei abweichenden Datenpunkten ..	6
Abbildung 6: Aus den Van-Genuchten-Parametern resultierende Desorptionskurve für den Horizont «A».....	7
Abbildung 7: In HYDRUS-1D eingegebene mittlere Grashöhe und Wurzeltiefe; das Zeitfenster der Messungen der Grashöhe ist hervorgehoben	9
Abbildung 8: Beispiel von an der Hangneigung und Exposition angepassten Strahlungsdaten vom 1. und 2. Juni 2018	10
Abbildung 9: Gegenüberstellung von durch den AWAT-Filter bzw. 12-Stunden Intervall berechneten Niederschlag und Niederschlags-Messwerte der MeteoSchweiz-Station.....	10
Abbildung 10: Kumulierter Niederschlag im Verlauf der Untersuchungsperiode. Die Messdaten der Hellmann-Regenmesser wurden zu den MeteoSchweiz Daten addiert.....	11
Abbildung 11: Abweichungen und RSME (mm) der vom Lysimeter gemessenen ET (ET_L) und den modellierten ET-Werten. ET_o FAO: Referenzevapotranspiration nach FAO-Methode; ET_p HYD: Durch HYDRUS-1D berechnete ET, mit Berücksichtigung der Bestandeshöhe; ET_m : Durch HYDRUS-1D berechnete ET unter Einbezug der Bodenfeuchtigkeit und Bestandeshöhe.	11
Abbildung 12: Modellierte und gemessene kumulierte Evapotranspiration über den Untersuchungszeitraum vom 1. Jan bis 1. Nov 2018	12
Abbildung 13: Verlauf der modellierten und gemessenen kumulierten Sickerwassermenge vom 1. Jan bis 1. Nov 2018	12
Abbildung 14: Aufsummierte Werte der Speicheränderung im Zeitraum von 1. April bis 1. November 2018.....	13
Abbildung 15: Verlauf des Bodenwassergehalts in drei Bodentiefen vom 1. April bis 1. Nov 2018, durch die TDR-Sonden gemessen und mit HYDRUS-1D modelliert.....	13
Abbildung 16: Modellierte Evapotranspiration und Evaporation sowie Vergleich von modellierten und gemessenen Matrixpotenzial an den unterschiedlich exponierten Standorten.....	14
Abbildung 17: Anteil der Evaporation an der Evapotranspiration, Resultate der HYDRUS-1D Berechnungen.....	16
Abbildung 18: Matrixpotenzial und Flüsse aus HYDRUS-1D für den Zeitraum zwischen dem 15.6 und 15.7	16
Abbildung 19: Verlauf der durch die Lysimeter gemessene ET	15

Anhang

Anhangsverzeichnis

1. Weitere Grafiken
2. Poster
3. Selbstständigkeitserklärung
4. R-Skript

1. Weitere Grafiken

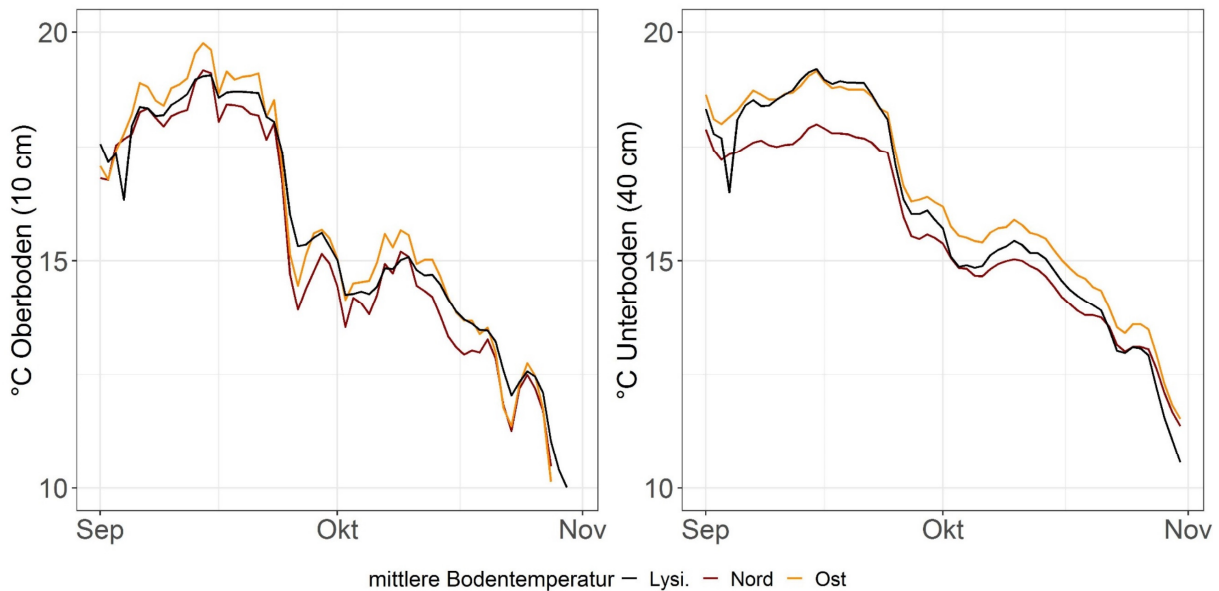


Abb. 1: Verlauf mittlere Bodentemperatur, Vergleich zwischen den zwei unterschiedlich exponierten Flächen und Lysimeter

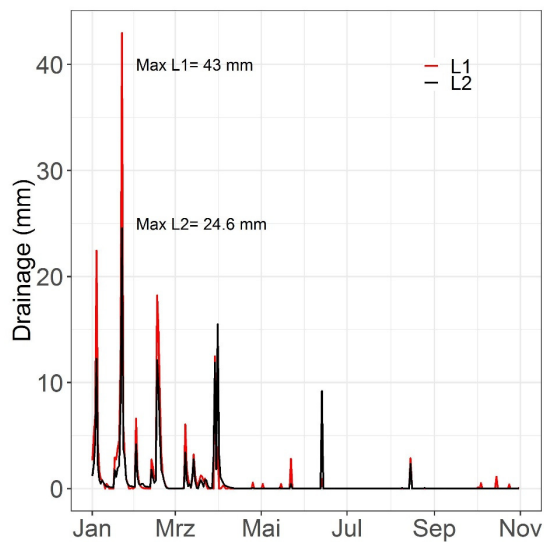


Abb. 2: Verlauf Sickerwassermenge der Lysimeter mit Maximalwerten (22. Januar 2018)

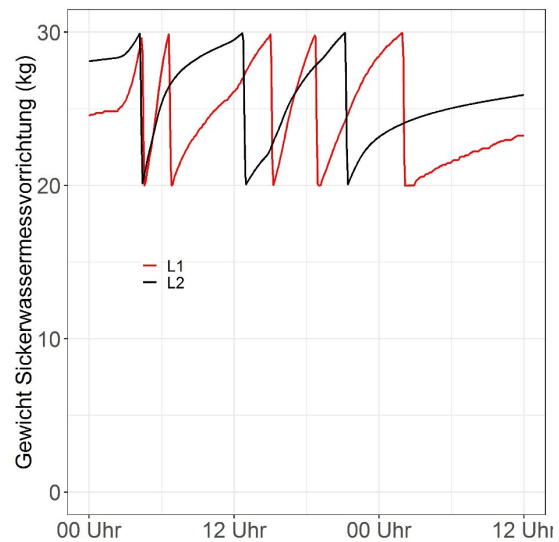


Abb. 3: Verlauf Rohdaten Sickerwassermessvorrichtung am 22. und 23. Januar, den Tagen an dem der höchste Messwert verzeichnet wurde. Während L1 fünf Entleerungen aufgezeichnet wurde, waren es bei L2 nur drei

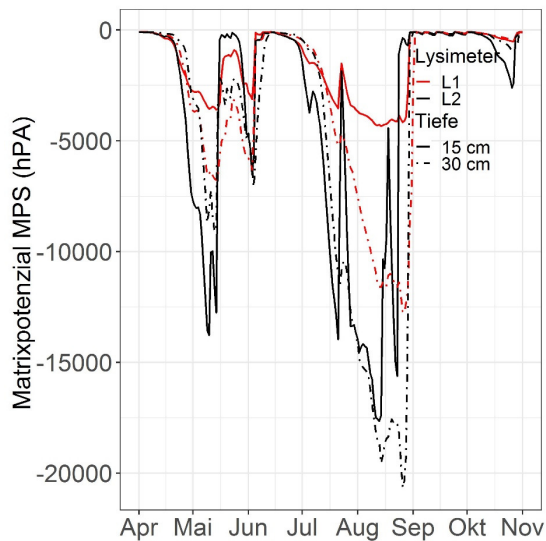


Abb. 4: Rohdaten MPS-Messwerte der Lysimeter

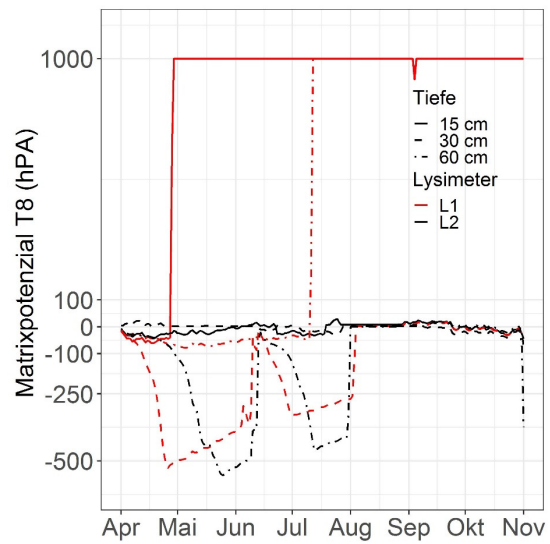


Abb. 5: Rohdaten T8-Messwerte der Lysimeter

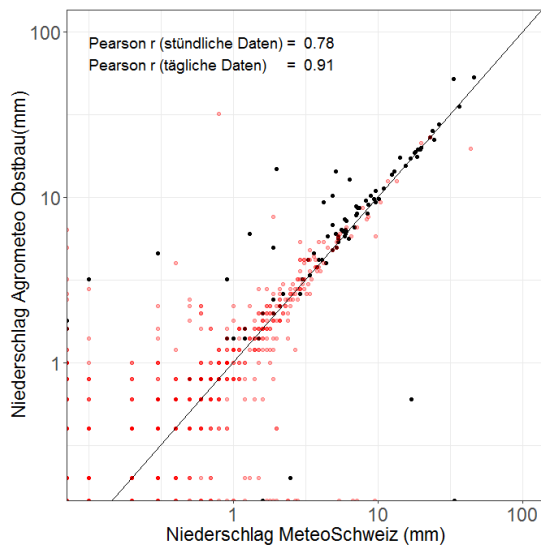


Abb. 6: Vergleich stündliche (rot) und tägliche (schwarz) Niederschlagsdaten der Agrometeo-Station Wädenswil Obstbau und der MeteoSchweiz-Station WAE

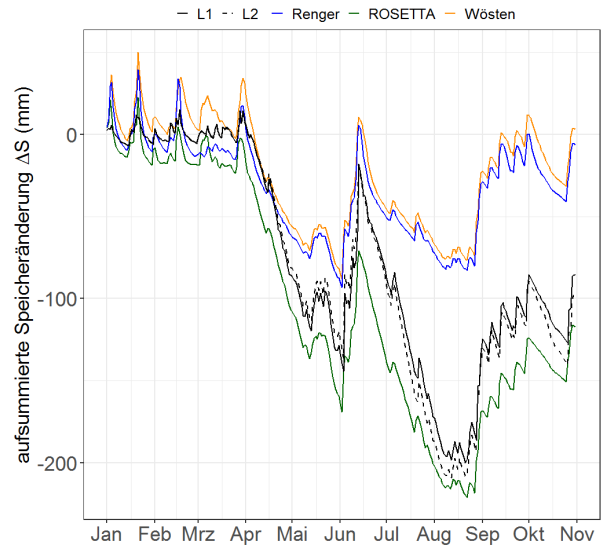


Abb. 7: Verlauf Speicheränderung von Januar bis November

Modellierung und Prognose der Bodenfeuchtigkeit mithilfe von Boden und Meteodaten am Beispiel einer Lysimeteranlage

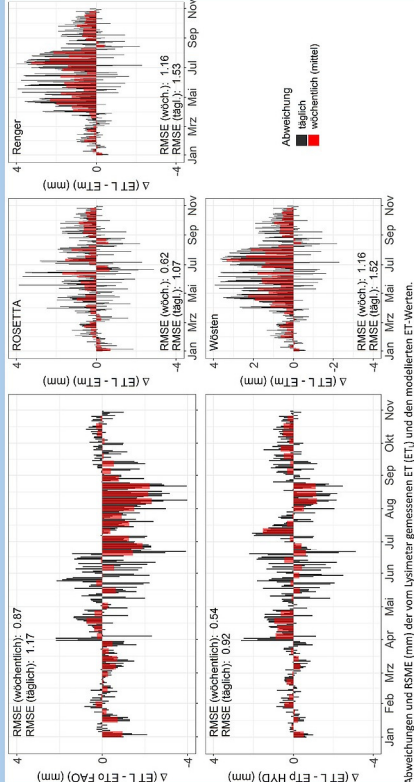
Masterarbeit von Valerio Volpe, Umwelt und Natürliche Ressourcen Februar 2019

Einleitung

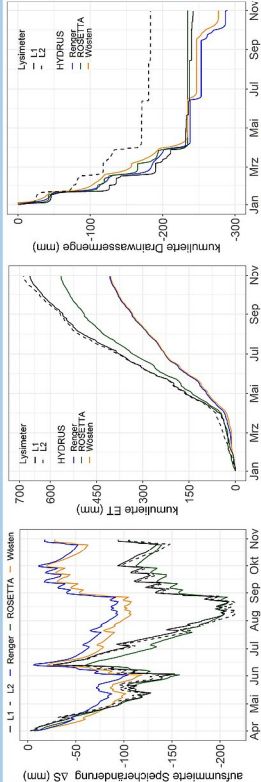
In der Schweiz werden laut Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) schätzungsweise 38'000 bis 55'000 Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche mehr oder weniger regelmässig bewässert (Weber & Schild, 2007). In Folge des Klimawandels werden in der Schweiz künftig längere Trockenperioden und somit eine vermehrte Notwendigkeit für die Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen erwartet (Occc, 2007). Die klimatische Wasserbilanz ist eine indirekte Methode, um die Wasserverfügbarkeit eines Standorts zu bemessen. Sie gibt an, wieviel des an einem Standort gefallenen Niederschlags wieder in die Atmosphäre gelangt und wieviel im Boden verbleibt oder versickert. Damit können beispielsweise Bewässerungsgaben berechnet werden, wobei dafür Informationen zur vorliegenden Bodenart verfügbar sein müssen. Eine Vorhersage der Entwicklung des Bodenwasservorrats würde eine effizientere Bewässerung ermöglichen. Diese Arbeit soll erkunden, wie gut modellierte Daten zu Wasserbilanz und Entwicklung der Bodenfeuchte mit gemessenen Werten einer Lysimeteranlage übereinstimmen. Dafür werden Daten zu Bodenart, Weiterdaten sowie Exposition und Neigung verwendet.

Material und Methoden

- Zwei identische wägbare Lysimeter am Standort der ZHAW in Wädenswil sammeln Daten vom 1. Jan bis 1. November 2018
- Die Lysimeter waren mit TDR-Sonden sowie Tensiometer ausgestattet und registrierten die Gewichtsveränderungen des Bodenmonoliths und die Sickenwassermenge
- Die Daten wurden benutzt um Wasserbilanz zu berechnen, verschiedene Ansätze zur Berechnung der Komponenten wurden angewandt
- Zwei Tensiometer-Logger zur Messung des Matrixpotenzials wurden an zwei unterschiedlich exponierten Hangabschnitten eingesetzt (Norden und Osten) um Einfluss der Exposition zu bemessen
- Die Software HYDRUS-1D wurde verwendet, um anhand von Boden- und Meteodaten die Wasserbilanz sowie die Bodenfeuchtigkeit zu modellieren. Drei Pedotransferfunktionen wurden zur Beschreibung der Desorptionskurve verwendet und die Resultate verglichen (ROSETTA; Wösten et al. (1999); Renger et al. (2008))



Abweichungen und RMSE (mm) der vom Lysimeter gemessenen ET (ET_L) und den modellierten ET-Werten.
ET_L FAO: Referenzevapotranspiration nach FAO-Methode; ET_P HYD: Durch HYDRUS-1D berechnete ET, mit Berücksichtigung der Bestandeshöhe;
ET_m: Durch HYDRUS-1D berechnete ET unter Einbezug der Bodenfeuchtigkeit und Bestandeshöhe.



Gegenüberstellung der gemessenen und modellierten Komponenten der Wasserbilanz.

Resultate

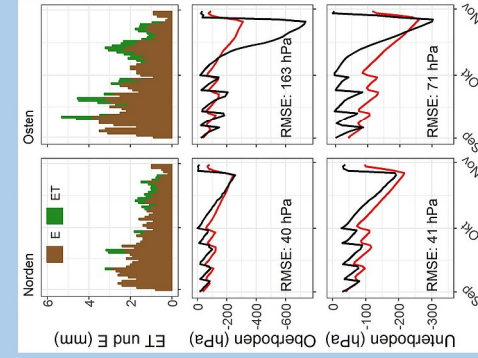
Die mit den drei verschiedenen Modellen berechnete, tatsächliche ET (ET_m) zeigt Abweichungen zu den Lysimeter-Daten. Die Berechnung mit den ROSETTA-Parametern zeigt für die Wasserbilanz die beste Übereinstimmung. Sowohl ET als auch Drainage und Speicherveränderung wurden gut nachgebildet. Die Abweichung in der ET_m der Modelle war hauptsächlich auf die unterschiedliche Evaporation zurückzuführen. Der Bodenwassergehalt wurde an besten mit den Parametern aus Wösten et al. (1999) abgebildet. Die Berechnungen konnten den Verlauf des Matrixpotenzials an den geneigten Untersuchungsflächen grob nachvollziehen. Am besten war die Übereinstimmung im Oberboden des nach Norden exponierten Standorts.

Diskussion

Das Modell-Resultat war stark von den verwendeten Van-Genuchten-Parametern sowie von den Vegetationsdaten abhängig. Weiter war der Blattflächenindex und die Wurzeliefe ausschlaggebend für die Genauigkeit der Modelle. Da die Bodendaten am Standort der rund 200 m entfernten Bodenfeuchtemessstation Wädenswil bestimmt wurden, könnte der im Lysimeter vorhandene Boden davon abweichende Eigenschaften aufweisen, welche den Bodenwasserhaushalt beeinflussen. Eine genauere Bestimmung der Bodenart im Lysimeter würde die Genauigkeit der Berechnung weiter verbessern. Der Einfluss der Exposition und Neigung konnte nur zum Teil nachgebildet werden. Da hier das Matrixpotenzial verglichen wurde, fielen die bereits diskutierten Fehlerquellen noch stärker ins Gewicht als beim Wassergehalt.



Der Untersuchungsstandort befindet sich auf dem Campus der ZHAW in Wädenswil. Im Hintergrund eines der Lysimeter sowie die Hallmann-Regenmesser zur genaueren Bestimmung der Niederschlagsmenge. Im Vordergrund der nach Osten exponierte Tensiometer-Loggerstandort.



Modellierte Evapotranspiration und Evaporation sowie Vergleich von modellierten und gemessenen Matrixpotenzial an drei unterschiedlich exponierten Standorten.

Verlauf des Bodenwassergehalts in drei Bodentiefen vom 1. April bis 1. Nov 2018, durch die TDR-Sonden gemessen (L1, L2) und mit HYDRUS-1D modelliert

Legend: L1, L2, Renger, ROSETTA, Wösten

RMSE L1 / L2: Renger 0.17 / 0.05, ROSETTA 0.17 / 0.05, Wösten 0.05 / 0.04

RMSE L1 / L2: Renger 0.06 / 0.06, ROSETTA 0.07 / 0.07, Wösten 0.05 / 0.04

RMSE L1 / L2: Renger 0.05 / 0.05, ROSETTA 0.04 / 0.04, Wösten 0.08 / 0.09

Legend: L1, L2, Renger, ROSETTA, Wösten

Legend: L1, L2, Renger, ROSETTA, Wösten

Legend: L1, L2, Renger, ROSETTA, Wösten

Fazit

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Bestandteile der Wasserbilanz sowie den Bodenwassergehalt mit HYDRUS-1D mit einer guten Übereinstimmung zu Messwerten berechnen lassen. Die Wahl der PTF zur Herleitung der Van-Genuchten-Parameter erwies sich als entscheidend für die Übereinstimmung von Modell und Messwerten. Weiter stellten sich die Vegetationsparameter Blattflächenindex und Wurzeliefe als wichtige Faktoren für die Genauigkeit des Modells heraus.

In Anbetracht des steigenden Wasserverbrauchs in der Landwirtschaft und von zukünftig wahrscheinlichen häufiger werdenden trockenen Sommern sind solche Modelle hilfreiche Instrumente, um die Effizienz von Bewässerungsinstrumenten zu steigern. Dies setzt jedoch verlässliche Daten zum vorliegenden Boden, der Vegetation und Meteo-Daten voraus.

Erklärung betreffend das selbständige Verfassen einer Masterarbeit im Departement Life Sciences und Facility Management

Mit der Abgabe dieser Masterarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat.

Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle verwendeten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt ausgewiesen sind, d.h. dass die Masterarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art treten Paragraph 39 und Paragraph 40 der Rahmenprüfungsordnung für die Bachelor- und Masterstudiengänge an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften vom 29. Januar 2008 sowie die Bestimmungen der Disziplinarmassnahmen der Hochschulordnung in Kraft.

Ort, Datum:

Biel, 12.02.19

Unterschrift:

V. Volja

Das Original dieses Formulars ist bei der ZHAW-Version aller abgegebenen Masterarbeiten im Anhang mit Original-Unterschriften und -Datum (keine Kopie) einzufügen.

3. R-Skript

```
## =====
## Loading libraries
## =====
library(tidyverse)
library(reshape2)
library(lubridate)
library(CMAtools)
library(sf)
library(raster)
library(scales)
library(leaflet)
library(SimilarityMeasures)
library(lwgeom)
library(ggspatial)
library(ggfortify)
library(gridExtra)
library(Evapotranspiration)
library(modelr)
library(cowplot)
library(sebkc)
library(solaR)
library(xlsx)
## =====
## Daten Import und Umwandlung
## =====

#####
#####Einlesen Messdaten
#####

##Meteodaten Einlesen
meteosw<-read_delim("Data/MA_VV/meteoswiss.csv",";")
meteosw_d<-read_delim("Data/MA_VV/MS_daily.csv",";")
meteosw$time<-ymd_h(meteosw$time)
meteosw_d$time<-ymd(meteosw_d$time)
MS_ET<-read_delim("Data/MA_VV/MS_ETo.csv",";")
MS_ET$time<-ymd(MS_ET$time)

agromet<-read_delim("Data/MA_VV/agrometeo-data.csv",";")
agromet_d<-read_delim("Data/MA_VV/agrometeo_daily.csv",";")
agromet$time<-dmy_hm(agromet$time)
agromet_d$time<-dmy(agromet_d$time)

##Regenmesser-Daten Einlesen
hell<-read_delim("Data/MA_VV/hellmann.csv",";")
hell$time<-as.POSIXct(paste(hell$Date, hell$hour),format="%d.%m.%Y %H:%M:%S",tz="UTC")
hell$mm_mitt<-((hell$mm_Ost+hell$mm_Nord)/2)
hell$gew_mitt<-((hell$gew_Ost+hell$gew_Nord)/2)
hell$hell_nied_cum<-cumsum(replace_na(hell$gew_mitt, 0)/10)

##Meteodaten in ein Datensatz fassen
meteo_full <- inner_join(meteosw,agromet,by="time")
meteo_1d <- inner_join(meteosw_d,agromet_d,by="time")
meteo_1d$rka150d0_cum <- cumsum(meteo_1d$rka150d0)
meteo_1d$nied_cum <- cumsum(meteo_1d$nied)

meteo_1d$time <- as.POSIXct(meteo_1d$time)
meteo_1d$Date <- as.POSIXct(meteo_1d$time)

meteo_full <-meteo_full %>%    ##Tageszeit abhängig von Einstrahlung zuweisen
  mutate(tday= ifelse(meteo_full$gre000h0>=10,"daytime","nighttime"))

##Messdaten Grashöhe
gras<-read_delim("Data/MA_VV/gras.csv",";")
gras$Date<-as.POSIXct(gras$Datum, format="%d.%m.%Y")
gras$Datum<-NULL
```

```

###LAI Einlesen
LAI<-read_delim("Data/MA_VV/LAI.csv",";")
LAI$Date<-as.POSIXct(dmy(LAI$Date))

###Daten Sensoren Lysimeter
Ltens<-read_delim("Data/MA_VV/tensiometer_full.csv",";")
Ltens$Timestamp<-paste(Ltens$date," ",Ltens$time)
Ltens$Timestamp<-dmy_hms(Ltens$Timestamp)
tens_daily<-Ltens %>%
  group_by(as.POSIXct(as.Date(Timestamp))) %>%
  summarize_all(mean) %>%
  mutate(TDR_W_005=((L1_TDR_W_005+L2_TDR_W_005)/2/100),
         TDR_W_010=((L1_TDR_W_010+L2_TDR_W_010)/2/100),
         TDR_W_030=((L1_TDR_W_030+L2_TDR_W_030)/2/100))

colnames(tens_daily)[1]<-"Date"

##Verarbeitete AWAT-Lysimeterdaten Einlesen

L_data01_1h<-read_delim("Data/MA_VV/1h_2018_01_P_and_ET_mean.csv",";")
L_data02_1h<-read_delim("Data/MA_VV/1h_2018_02_P_and_ET_mean.csv",";")
L_data03_1h<-read_delim("Data/MA_VV/1h_2018_03_P_and_ET_mean.csv",";")
L_data04_1h<-read_delim("Data/MA_VV/1h_2018_04_P_and_ET_mean.csv",";")
L_data05_1h<-read_delim("Data/MA_VV/1h_2018_05_P_and_ET_mean.csv",";")
L_data06_1h<-read_delim("Data/MA_VV/1h_2018_06_P_and_ET_mean.csv",";")
L_data07_1h<-read_delim("Data/MA_VV/1h_2018_07_P_and_ET_mean.csv",";")
L_data08_1h<-read_delim("Data/MA_VV/1h_2018_08_P_and_ET_mean.csv",";")
L_data09_1h<-read_delim("Data/MA_VV/1h_2018_09_P_and_ET_mean.csv",";")
L_data10_1h<-read_delim("Data/MA_VV/1h_2018_10_P_and_ET_mean.csv",";")

L_data1h<-rbind(L_data01_1h,L_data02_1h,L_data03_1h,L_data04_1h,L_data05_1h,L_data06_1h,L_data07_1h,L_data08_1h,L_data09_1h,L_data10_1h)
colnames(L_data1h)[1]<-"Datetime"
rm(L_data01_1h,L_data02_1h,L_data03_1h,L_data04_1h,L_data05_1h,L_data06_1h,L_data07_1h,L_data08_1h,L_data09_1h,L_data10_1h)

##Rohdaten AWAT Einlesen
D_data01_raw<-read_delim("Data/MA_VV/RohdatenLysi/processed_data_1min_10min_60min_1d_xlsx2018_01_raw_data_AWAT.csv",";")
D_data02_raw<-read_delim("Data/MA_VV/RohdatenLysi/processed_data_1min_10min_60min_1d_xlsx2018_02_raw_data_AWAT.csv",";")
D_data03_raw<-read_delim("Data/MA_VV/RohdatenLysi/processed_data_1min_10min_60min_1d_xlsx2018_03_raw_data_AWAT.csv",";")
D_data04_raw<-read_delim("Data/MA_VV/RohdatenLysi/processed_data_1min_10min_60min_1d_xlsx2018_04_raw_data_AWAT.csv",";")
D_data05_raw<-read_delim("Data/MA_VV/RohdatenLysi/processed_data_1min_10min_60min_1d_xlsx2018_05_raw_data_AWAT.csv",";")
D_data06_raw<-read_delim("Data/MA_VV/RohdatenLysi/processed_data_1min_10min_60min_1d_xlsx2018_06_raw_data_AWAT.csv",";")
D_data07_raw<-read_delim("Data/MA_VV/RohdatenLysi/processed_data_1min_10min_60min_1d_xlsx2018_07_raw_data_AWAT.csv",";")
D_data08_raw<-read_delim("Data/MA_VV/RohdatenLysi/processed_data_1min_10min_60min_1d_xlsx2018_08_raw_data_AWAT.csv",";")
D_data09_raw<-read_delim("Data/MA_VV/RohdatenLysi/processed_data_1min_10min_60min_1d_xlsx2018_09_raw_data_AWAT.csv",";")
D_data10_raw<-read_delim("Data/MA_VV/RohdatenLysi/processed_data_1min_10min_60min_1d_xlsx2018_10_raw_data_AWAT.csv",";")
D_data_raw<-rbind(D_data01_raw,D_data02_raw,D_data03_raw,D_data04_raw,
                  D_data05_raw,D_data06_raw,D_data07_raw,D_data08_raw,
                  D_data09_raw,D_data10_raw)
colnames(D_data_raw)[1]<-"Datetime"
D_data_raw$Datetime<-as.POSIXct(D_data_raw$Datetime, format="%Y/%m/%d %H:%M:%S")
rm(D_data01_raw,D_data02_raw,D_data03_raw,D_data04_raw,
   D_data05_raw,D_data06_raw,D_data07_raw,D_data08_raw,
   D_data09_raw,D_data10_raw)

##Fehlerhafte Daten im Lysimeter-Datensatz NA setzen
L_data1h[2:5]<-replace(L_data1h[2:5],(L_data1h[2:5]>200) , 0)
D_data_raw[2:5]<-replace(D_data_raw[2:5],(D_data_raw[2:5]>200) , 0)

```

```

###Tägliche Daten berechnen (AWAT-Filter)
L_data1d<- L_data1h%%>%
  group_by(as.Date.POSIXct(Datetime))%>%
  summarize(L1_P1d=sum(L1_P60min),L2_P1d=sum(L2_P60min),L1_ET1d=sum(L1_ET60min),L2_ET1d=sum(L2_ET60min))
D_data1d<- D_data_raw%%>%
  group_by(as.Date.POSIXct(Datetime))%>%
  summarize(L1_D_1d=sum(L1_D),L2_D_1d=sum(L2_D),L1_L_1d=sum(L1_L),L2_L_1d=sum(L2_L))

colnames(L_data1d)[1] <- "Date"
colnames(D_data1d)[1] <- "Date"
L_data1d$Date<-as.POSIXct(L_data1d$Date)
D_data1d$Date<-as.POSIXct(D_data1d$Date)
L_data1d$DOY<-yday(L_data1d$Date)
D_data1d$DOY<-yday(D_data1d$Date)
filler<-data.frame(Date=as.POSIXct("2018-11-01 00:00:00"),L1_P1d=0,L2_P1d=0,L1_ET1d=0,L2_ET1d=0,DOY=305)
L_data1d<-rbind(L_data1d,filler)

###Rohdaten Lysimetergewichte
lysi_weight_raw<-read_delim("Data/MA_VV/Lysimeter_full.csv",";" )
lysi_weight_raw$Timestamp<-as.POSIXct(strptime(lysi_weight_raw$Timestamp, format="%d.%m.%Y %H:%M", tz="GMT"))

lysi_weight_raw<-lysi_weight_raw %>% ##Ungültige Daten (NA) auf letzten gültigen Wert setzen
  fill(.,2:5,.direction="down")

lysi_weight<-cbind(lysi_weight_raw$Timestamp, ##Gleitmittelwert anwenden, um Änderungen aufgrund von Messfehlern herauszufiltern
  as.data.frame(round(rollapply(lysi_weight_raw[2:3],width=5, FUN=mean, by.column=T, fill=NA),3)),
  as.data.frame(round(rollapply(lysi_weight_raw[4:5],width=5, FUN=mean, by.column=T, fill=NA),2)))
colnames(lysi_weight)[1]<-"Timestamp"

##Daten Plantcare-Sensoren
pcare <- read_delim("C:/Users/user/Dropbox/Studium/Masterarbeit/RProjekt/Master/Data/MA_VV/Plantcare_final.csv",";",
  escape_double = FALSE,col_types = cols(PC_N_10_M = col_number(),
    PC_N_20_M = col_number(),
    PC_N_40_M = col_number(),
    PC_O_10_M = col_number(),
    PC_O_20_M = col_number(),
    PC_O_40_M = col_number(),
    PC_N_10_T = col_number(),
    PC_N_20_T = col_number(),
    PC_N_40_T = col_number(),
    PC_O_10_T = col_number(),
    PC_O_20_T = col_number(),
    PC_O_40_T = col_number()), trim_ws = TRUE)

pcare$DateTime<-dmy_hm(pcare$DateTime)
pcare_fil<-cbind(pcare$DateTime, ##Glättung Feuchtigkeitsdaten mit Gleitmittelwert
  as.data.frame(round(rollapply(pcare[2:7],width=5, FUN=mean, by.column=T, fill=NA),1)),pcare[8:13])
colnames(pcare_fil)[1]<-"Datetime"

pcare_t_ampli<-pcare%%>% ##Amplitude Tagestemperaturen
  group_by(as.POSIXct(as.Date(DateTime))%>%
  summarise_at(8:13,funs(max=max(.,na.rm = T),min=min(.,na.rm = T)))
pcare_t_ampli <- pcare_t_ampli %>%
  mutate( PC_N_10_T_amp =PC_N_10_T_max-PC_N_10_T_min ,
    PC_N_20_T_amp =PC_N_20_T_max-PC_N_20_T_min ,
    PC_N_40_T_amp =PC_N_40_T_max-PC_N_40_T_min,

```

```

PC_O_10_T_amp =PC_O_10_T_max-PC_O_10_T_min ,
PC_O_20_T_amp =PC_O_20_T_max-PC_O_20_T_min ,
PC_O_40_T_amp =PC_O_40_T_max-PC_O_40_T_min )
colnames(pcare_t_ampli)[1]<-"Date"

pcare_t_mean<-pcare %>% ## Tagesmittel Temperatur
  group_by(as.POSIXct(as.Date(DateTime)))%>%
  summarise_at(8:13,funs(mean=mean(.,na.rm=T)))
colnames(pcare_t_mean)[1]<-"Date"

pcare_daily<-pcare_fil %>%
  group_by(as.POSIXct(as.Date(Datetime)))%>%
  summarize_at(2:7,(funs(mean(.,na.rm=T))))
colnames(pcare_daily)[1]<-"Date"

pcare_daily<-cbind(pcare_daily,pcare_t_mean[2:7],pcare_t_ampli[2:19])

##Daten Delta-6 Logger
log_nord<-read_delim("Data/MA_VV/log_nord.csv",";")
log_ost<-read_delim("Data/MA_VV/log_ost.csv",";")
log_nord$datetime<-dmy_hm(log_nord$datetime)
log_ost$datetime<-dmy_hm(log_ost$datetime)
log_data<-full_join(log_nord,log_ost,by="datetime")
colnames(log_data)[1]<-"Datetime"

log_data<-mutate(rowwise(log_data),N_UB=median(c(N40_1,N40_3), na.rm=T)) ##N40_2 musste entfe
rnt werden, da Tensiometer offensichtlich defekt
log_data<-mutate(rowwise(log_data),O_UB=median(c(O40_1,O40_2,O40_3), na.rm=T))
log_data<-mutate(rowwise(log_data),N_OB=median(c(N20_1,N20_2,N20_3), na.rm=T))
log_data<-mutate(rowwise(log_data),O_OB=median(c(O20_1,O20_2,O20_3), na.rm=T))
ungroup(log_data)
log_data$OB_mitt<-(log_data$N_OB+log_data$O_OB)/2
log_data$UB_mitt<-(log_data$N_UB+log_data$O_UB)/2

log_data_1d <- log_data %>% ##Zusammenfassen in Tagesdaten
  group_by(as.POSIXct(as.Date(Datetime)))%>%
  summarize_all((funs(mean(.,na.rm=T))))
colnames(log_data_1d)[1]<-"Date"

##Daten Bodenfeuchtigkeit-Messstation FaBo ZH
fabo<-read_delim("Data/MA_VV/FaBo.csv",";")
fabo$Datetime<-dmy_hm(fabo$Datetime)
fabo[4]<-NULL
fabo<-fabo%>%
  group_by(as.POSIXct(as.Date(Datetime)))%>%
  summarize_at(2:3,(funs((mean(.,na.rm=T)))))
fabo[2:3]<-round(fabo[2:3],2)*10
colnames(fabo)[1]<-"Date"

#####
###Einlesen Hydrus-Outputs
#####

hyd_meteo<-read_delim("Data/MA_VV/Hydrus_out_meteo.csv",";")
hyd_meteo<-hyd_meteo[1:33] %>% filter_all(any_vars(!is.na(.)))
hyd_meteo<-na.omit(hyd_meteo)

end_date<-as.POSIXct("2018-11-01 00:00:00", tz="UTC") ##Start und Enddatum der Berechnunge
n auslesen und zuweisen
start_date<- end_date - days(hyd_meteo$Ren_Time[nrow(hyd_meteo)]-1)

hyd_meteo$Date<-as.POSIXct(as.Date(seq.POSIXt(from=start_date, to=end_date,by = "1 day")))
hyd_meteo<-hyd_meteo %>% ##Niederschlag ja/nein
zuweisen

```

```

mutate(Prec_01 = ifelse(hyd_meteo$Ren_Prec>0,"1","0"))
hyd_meteo<-hyd_meteo %>%      ##Monat zuweisen
  mutate(Month= as.factor(month(hyd_meteo$Date)))

hyd_out_T<-read_delim("Data/MA_VV/Hydrus_out_T.csv",";")
hyd_out_T<-hyd_out_T %>% filter_all(any_vars(!is.na(.)))
#hyd_out_T<-na.omit(hyd_out_T)
hyd_out_T[,1:66]<-sapply(hyd_out_T[,1:66], as.double)
hyd_out_T$Datetime<-as.POSIXct(as.numeric(hyd_out_T$Ren_Time)*24*60*60, origin=start_date-1)

hyd_T_d<-cbind(hyd_out_T$Datetime,(hyd_out_T[2:66]*0.5))
colnames(hyd_T_d)[1]<- "Datetime"
hyd_T_d<-hyd_T_d%>%
  group_by(as.POSIXct(as.Date(Datetime)))%>%
  summarize_all(sum)

colnames(hyd_T_d)[1]<- "Date"  ##Berechnungen Evaporation, Infiltration und ETa
hyd_T_d[,1,3:66]<-hyd_T_d[,1,3:66]*2
hyd_T_d<-hyd_T_d %>%
  mutate(Ren_Evap_a=(lead(Ren_sumEvap)-Ren_sumEvap)*10,
         Ros_Evap_a=(lead(Ros_sumEvap)-Ros_sumEvap)*10,
         RETC_Evap_a=(lead(RETC_sumEvap)-RETC_sumEvap)*10,
         Ren_Infil_a=(lead(Ren_sumInfil)-Ren_sumInfil)*10,
         Ros_Infil_a=(lead(Ros_sumInfil)-Ros_sumInfil)*10,
         RETC_Infil_a=(lead(RETC_sumInfil)-RETC_sumInfil)*10,
         Ros_ETa=round(Ros_vRoot*10+Ros_Evap_a,2),
         Ren_ETa=round(Ren_vRoot*10+Ren_Evap_a,2),
         RETC_ETa=round(RETC_vRoot*10+RETC_Evap_a,2))

####Hydrus Obs_Node-File einlesen
hyd_out<-read_delim("Data/MA_VV/Hydrus_out_WG.csv",";")
hyd_out<-hyd_out %>% filter_all(any_vars(!is.na(.)))
hyd_out$Datetime<-as.POSIXct(as.numeric(hyd_out$Ren_time)*24*60*60, origin=start_date-1)

hyd_daily_tot<-hyd_out %>% ###Zusammenfassen in Tagesdaten
  group_by(as.POSIXct(as.Date(Datetime))) %>%
  summarize_all(mean)%>%
  slice(1:nrow(hyd_meteo))
colnames(hyd_daily_tot)[1]<- "Date"

##Einlesen Daten zu Expositionsrechnungen
hyd_exp<-read_delim("Data/MA_VV/Hydrus_ExpoTObs.csv",";")
hyd_exp<-hyd_exp %>% filter_all(any_vars(!is.na(.)))
hyd_exp$Datetime<-as.POSIXct(as.numeric(hyd_exp$N_Time)*24*60*60, origin=(end_date-days(ceiling(nrow(hyd_exp)/2))-1))

hyd_exp_T_d<-hyd_exp %>% ###Zusammenfassen in Tagesdaten
  dplyr::select(2:22,34:51,65) %>%
  group_by(as.POSIXct(as.Date(Datetime)))%>%
  summarize_all(sum)
#hyd_exp_N_d[nrow(hyd_exp_N_d),2:32]<-hyd_exp_N_d[nrow(hyd_exp_N_d),2:32]*2  ##Letzte Reihe mit 2 Multiplizieren, da nur ein Datenpunkt vorhanden
colnames(hyd_exp_T_d)[1]<- "Date"

hyd_exp_T_d<-hyd_exp_T_d %>%
  mutate(N_Evap_a=(lead(N_sumEvap)-N_sumEvap)*10,
         N_Infil_a=(lead(N_sumInfil)-N_sumInfil)*10,
         N_ETa=round(N_vRoot*10+N_Evap_a,2),
         O_Evap_a=(lead(O_sumEvap)-O_sumEvap)*10,
         O_Infil_a=(lead(O_sumInfil)-O_sumInfil)*10,
         O_ETa=round(O_vRoot*10+O_Evap_a,2))
hyd_exp_T_d<-hyd_exp_T_d%>%
  fill(.,42:47,.direction="down")

hyd_exp_ON_d<-hyd_exp %>% ###Zusammenfassen in Tagesdaten
  dplyr::select(24:32, 56:65) %>%

```

```

    group_by(as.POSIXct(as.Date(Datetime)))>%
    summarize_all(mean)
#hyd_exp_0_d[nrow(hyd_exp_0_d),2:33]<-hyd_exp_0_d[nrow(hyd_exp_0_d),2:33]*2  ##Letzte Reihe mit
# 2 Multiplizieren, da nur ein Datenpunkt vorhanden
colnames(hyd_exp_ON_d)[1]<-"Date"

nodes<-read_delim("Data/MA_VV/Nodes_inf.csv",";")
nodes<-nodes[1:12] %>% filter_all(any_vars(!is.na(.)))
nodes$Date<-as.POSIXct(as.Date(nodes$Time, origin="2018-01-01"))

tens_daily_fil <- tens_daily %>%
  filter(Date>=start_date & Date<=end_date)

## =====
## Verarbeitung Lysimetergewichte
## =====

#####
####Berechnung Drain
#####
##Selektion der Messpunkte im 5 min Abstand
lysi_weight_00<-lysi_weight %>%
  filter((minute(Timestamp) %% 5) ==0)%>%
  mutate(Date=as.POSIXct(Timestamp))

##Veränderung Drain-Gewicht berechnen
lysi_weight_00<-lysi_weight_00 %>%
  mutate(L1_D_delta=lead(L1_D) -L1_D,
         L2_D_delta=lead(L2_D) -L2_D)
##Nur positive Drain-Gewichtsveränderungen über 0.002 kg übernehmen, andere auf 0
lysi_weight_00$L1_D_delta<- ifelse(lysi_weight_00$L1_D_delta<0.002,0,lysi_weight_00$L1_D_delta)
lysi_weight_00$L2_D_delta<- ifelse(lysi_weight_00$L2_D_delta<0.002,0,lysi_weight_00$L2_D_delta)

###Drain Daten in Stundendaten zusammenfassen
drain_weight_dh0<-lysi_weight_00 %>%
  group_by(Timestamp=floor_date(Timestamp,"1 hour")) %>%
  summarize_all(sum) %>%
  dplyr::select(-c(2:6))

###Drain Daten in 6-Stundendaten zusammenfassen
drain_weight_dh06<-lysi_weight_00 %>%
  group_by(Timestamp=floor_date(Timestamp,"6 hour")) %>%
  summarize_all(sum) %>%
  dplyr::select(-c(2:6))

#####
####Berechnung Lysimeter-Masse
#####

##Selektion der Messpunkte im einem Zeitfenster (timestep)
timestep=12
lysi_weight_ts<-lysi_weight %>%
  filter(hour(Timestamp)%% timestep ==0 & (minute(Timestamp)==0))
##Veränderung Lysimeter-Gewicht im Zeitfenster berechnen
lysi_weight_ts<-lysi_weight_ts %>%
  mutate(L1_L_delta_ts=lead(L1_L) -L1_L,
         L2_L_delta_ts=lead(L2_L) -L2_L)
###Drain Menge im Zeitfenster summieren
drain_weight_ts<-lysi_weight_00 %>%
  group_by(Timestamp=floor_date(Timestamp, (paste(timestep, " hour")))) %>%
  summarize_all(sum) %>%
  dplyr::select(-c(2:6))%>%
  rename(L1_D_delta_ts=L1_D_delta,L2_D_delta_ts=L2_D_delta)

```



```

##Drain-Daten und Lysimeter-Daten zusammenführen
lysi_weight_ts<-full_join(lysi_weight_ts,drain_weight_ts, by="Timestamp")

##Gesamte Veränderung des Gewichts
lysi_weight_ts<- lysi_weight_ts %>%
  mutate(L1_delta_tot_ts=L1_L_delta_ts+L1_D_delta_ts,
         L2_delta_tot_ts=L2_L_delta_ts+L2_D_delta_ts)

###Zuweisung Daten zu ET oder P
lysi_weight_ts <- lysi_weight_ts %>%
  mutate(L1_ET_ts=ifelse(L1_delta_tot_ts<0,L1_delta_tot_ts,0),
         L2_ET_ts=ifelse(L2_delta_tot_ts<0,L2_delta_tot_ts,0),
         L1_P_ts=ifelse(L1_delta_tot_ts>=0,L1_delta_tot_ts,0),
         L2_P_ts=ifelse(L2_delta_tot_ts>=0,L2_delta_tot_ts,0))

##Lysimeter Änderungs-Daten in Tagesdaten zusammenfassen
lysi_weight_daily<-lysi_weight_ts%>%
  group_by(as.POSIXct(as.Date(Timestamp))) %>%
  summarize_all(sum) %>%
  dplyr::select(-c(2:8,11:12))
colnames(lysi_weight_daily)[1]<- "Date"
lysi_weight_daily[2:5]<-round(lysi_weight_daily[2:5],2)

lysi_weight_daily<-lysi_weight_daily %>%
  filter(Date>=as.Date("2018-01-01")& Date<=as.Date("2018-11-01"))
lysi_weight_daily$month<-month(lysi_weight_daily$Date)

# write.xlsx(lysi_weight_daily,file="Data/MA_VV/Lysimeter_output.xlsx", sheetName = "gefiltert
", col.names=T, row.names = T)

## =====
###Berechnungen tägliche Evapotranspiration anhand der Meteo-Schweiz/Agrometeo Messdaten
## =====
n=length(meteo_1d$time)
ET24<-data.frame(AM_d=double(n),MS_d=double(n))
a<-ETo(Tmax=meteo_1d$tre200dx,Tmin=meteo_1d$tre200dn,
       RHmax=meteo_1d$ure200dx, RHmin=meteo_1d$ure200dn, uz=meteo_1d$fk1010d0, z=2,
       latitude=47.2, longitude=8.7, altitude=520,
       Rs=(meteo_1d$gre000d0*0.0864), DOY=yday(meteo_1d$time),
       as=0.25, bs=0.5, Krs=0.16, albedo=0.23, surface="grass")
ET24$MS_d<-a$ETo

a<-ETo(Tmax=meteo_1d$temp_max,Tmin=meteo_1d$temp_min,
       RHmax=meteo_1d$rlf_max, RHmin=meteo_1d$rlf_min,
       latitude=47.2, longitude=8.7, altitude=520,
       DOY=yday(meteo_1d$time),Rs=meteo_1d$glob*0.0864/24,
       as=0.25, bs=0.5, Krs=0.16, albedo=0.23, surface="grass")
ET24$AM_d<-a$ETo

ET24$Date<-meteo_1d$Date

## =====
###Berechnungen Einstrahlung auf Ost/Nord exponierter Lage (stündlich)
## =====

#####
#Berechnungen tägliche Evapotranspiration anhand der Meteo-Schweiz/Agrometeo Messdaten
#####
n=length(meteo_1d$time)
ET24<-data.frame(AM_d=double(n),MS_d=double(n))

```

```

a<-ETo(Tmax=meteo_1d$tre200dx,Tmin=meteo_1d$tre200dn,
        RHmax=meteo_1d$ure200dx, RHmin=meteo_1d$ure200dn, uz=meteo_1d$fk1010d0, z=2,
        latitude=47.2, longitude=8.7, altitude=520,
        Rs=(meteo_1d$gre000d0*0.0864), DOY=yday(meteo_1d$time),
        as=0.25, bs=0.5, Krs=0.16, albedo=0.23, surface="grass")
ET24$MS_d<-a$ETo

a<-ETo(Tmax=meteo_1d$temp_max,Tmin=meteo_1d$temp_min,
        RHmax=meteo_1d$rlf_max, RHmin=meteo_1d$rlf_min,
        latitude=47.2, longitude=8.7, altitude=520,
        DOY=yday(meteo_1d$time),Rs=meteo_1d$glob*0.0864/24,
        as=0.25, bs=0.5, Krs=0.16, albedo=0.23, surface="grass")
ET24$AM_d<-a$ETo

ET24$Date<-meteo_1d$Date

#####
## Berechnung Expositionsabhängige Einstrahlungen
#####
glob_h<-data.frame(time=meteo_full$time, Tempmax=meteo_full$tre200hx,
##Eingangsdaten für stündliche Berechnung aus Datensatz Meteoschweiz
                    TempMin=meteo_full$tre200hn,Ta=meteo_full$tre200h0, G0=meteo_full$gre000h0)

glob_h<-dfI2Meteo(file=glob_h,format="%Y-%m-%d %H:%M:%S", lat=47.2, time.col = "time")
##Umwandlung in Meteo-Format für solaR-Paket
sol_ost_h<-calcGef(lat=47.2, modeTrk = "fixed",modeRad="bdI", dataRad = glob_h,
## Berechnung für Ost-Exponierte Lage mit 16° Neigung (beta)
                    beta=16, alfa=-90, iS=1, sunGeometry="michalsky", sample="hour", keep.night
                    = T,alb=0)
sol_nord_h<-calcGef(lat=47.2, modeTrk = "fixed",modeRad="bdI", dataRad = glob_h,
## Berechnung für Nord-Exponierte Lage mit 16° Neigung (beta)
                    beta=16, alfa=180, iS=1, sunGeometry="michalsky", sample="hour", keep.nigh
                    t = T,alb=0)

sol_ref_h<-calcG0(lat=47.2, modeRad="bdI", dataRad = glob_h,sample="hour", keep.night = T,
                    sunGeometry="michalsky") ## Berechnung für eine Referenz ohne Neigung

strahl_nord_h<-as.data.frameI(sol_nord_h, complete=T)
strahl_ost_h<-as.data.frameI(sol_ost_h, complete=T)
strahl_ref_h<-as.data.frameI(sol_ref_h, complete=T)

NetRad_aspect<-data.frame(meteo_full$gre000h0,strahl_nord_h$G,strahl_ost_h$G,strahl_ref_h$G)
NetRad_aspect<-cbind(row.names(strahl_nord_h),NetRad_aspect)
colnames(NetRad_aspect)<-c("datetime", "NetRad_MS", "NetRad_N", "NetRad_O", "RefRad")
NetRad_aspect$datetime<-as.POSIXct(NetRad_aspect$datetime)
NetRad_aspect[is.na(NetRad_aspect)]<-0

strahl_exp<-ggplot()+ #####Grafik ausschnitt mit berechneter Stahlung
  geom_path(data=NetRad_aspect,aes(x=datetime, y=NetRad_N, color="Nord"), size=1)+
  geom_path(data=NetRad_aspect,aes(x=datetime, y=NetRad_O, color="Ost"), size=1)+
  geom_path(data=NetRad_aspect,aes(x=datetime, y=RefRad, color="Gemessen MS"), size=1)+
  scale_x_datetime(limits=c(as.POSIXct("2018-06-01 00:00:00"),as.POSIXct("2018-06-03 00:00:00"
)),
                    date_labels="%d.%b",name=NULL, breaks=c(as.POSIXct("2018-06-01 12:00:00"),a
s.POSIXct("2018-06-02 12:00:00")))+
  scale_y_continuous(name="Globalstrahlung in W/m2")+
  scale_color_manual(values=c("black","dark green","red"),
                      name=NULL)+
  guides(color=guide_legend(""))+
  theme_bw(base_size=17)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
        legend.position=c(.2,.9),
        legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
        legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))

```

```
ggsave(strahl_exp, file="strahl.jpg", width=16*1.25, height=16*1.25, units="cm", dpi=96)
```

```
NetRad_aspect_daily<-NetRad_aspect %>% ##Die stündlichen Daten werden in Tagesdaten zusammeng  
efasst
```

```
  group_by(as.Date(datetime))%>%  
  summarize_all(mean)
```

```
##Datei für Hydrus-Input vorbereiten und speichern
```

```
set_hydrus_nord<-data.frame(meteo_1d$time,NetRad_aspect_daily$NetRad_N,meteo_1d$tre200dx,meteo_1d$tre200dn,meteo_1d$ure200d0,meteo_1d$fk1010d0,meteo_1d$su2000d0, meteo_1d$rka150d0)  
colnames(set_hydrus_nord)<-c("time","radN","tmax","tmin","humidity","wind","sunshine","prec")  
set_hydrus_nord <- set_hydrus_nord %>%  
  mutate(radN=radN*0.0864, prec= prec/10, wind= wind*86.4, hCritA=((log(humidity,base=exp(1))*(  
(tmax+tmin)/2+272.2)*8.314)/(9.81*0.018015)))
```

```
set_hydrus_ost<-data.frame(meteo_1d$time,NetRad_aspect_daily$NetRad_O,meteo_1d$tre200dx,meteo_1d$tre200dn,meteo_1d$ure200d0,meteo_1d$fk1010d0,meteo_1d$su2000d0, meteo_1d$rka150d0)  
colnames(set_hydrus_ost)<-c("time","radO","tmax","tmin","humidity","wind","sunshine","prec")  
set_hydrus_ost <- set_hydrus_ost %>%  
  mutate(radO=radO*0.0864, prec= prec/10, wind= wind*86.4,hCritA=set_hydrus_nord$hCritA)
```

```
set_hydrus_ref<-data.frame(meteo_1d$time,NetRad_aspect_daily$NetRad_MS,meteo_1d$tre200dx,meteo_1d$tre200dn,meteo_1d$ure200d0,meteo_1d$fk1010d0,meteo_1d$su2000d0, meteo_1d$rka150d0)  
colnames(set_hydrus_ref)<-c("time","radMS","tmax","tmin","humidity","wind","sunshine","prec")  
set_hydrus_ref <- set_hydrus_ref %>%  
  mutate(radMS=radMS*0.0864, prec= prec/10, wind= wind*86.4,hCritA=set_hydrus_nord$hCritA)
```

```
write.xlsx(set_hydrus_nord,file="Data/MA_VV/rad_to_hydrus.xlsx", sheetName = "Nord", col.names  
=T, row.names = T)  
write.xlsx(set_hydrus_ost,file="Data/MA_VV/rad_to_hydrus.xlsx",append=T, sheetName = "Ost", co  
l.names=T, row.names = T)  
write.xlsx(set_hydrus_ref,file="Data/MA_VV/rad_to_hydrus.xlsx",append=T, sheetName = "Ref", co  
l.names=T, row.names = T)
```

```
## =====  
####Vergleich Niederschlagsdaten aus Hellmann-Regenmesser und MS/AM-Aufzeichnungen  
## =====
```

```
WS_regen<-meteo_full%>%  
  dplyr::select(time,rre150h0,nied)
```

```
regen<-full_join(WS_regen,hell, by="time")  
regen<-regen%>%  
  arrange(time)
```

```
n_dates<-as.POSIXct(strptime(0, format= "%Y-%m-%d %H:%M:%S"))  
j=1  
i=1  
n=0  
ag_menge<-as.numeric(0)  
ms_menge<-as.numeric(0)
```

```
t_start<-as.POSIXct("2018-06-15 00:00",format= "%Y-%m-%d %H:%M")  
t_end<-t_start+ddays(4)
```

```
for(i in 1:nrow(regen)) {  
  if(!is.na(regen$gew_mitt[i])&(regen$gew_mitt[i]>0)) {  
    t_end<-regen$time[i]  
  
    n_dates[j]<-t_end  
  
    ms_menge[j] <- regen %>%  
      filter(time>=(t_start) & time<=(t_end)) %>%  
      summarise(sum(na.omit(rre150h0)))  
    ag_menge[j] <- regen %>%  
      filter(time>=(t_start) & time<=(t_end)) %>%
```

```

        summarise(sum(na.omit(nied)))

    t_start<-t_end+dminutes(1)
    j<-j+1
  }
}

ag_menge<-data.frame(Reduce(rbind, ag_menge))
ms_menge<-data.frame(Reduce(rbind, ms_menge))

cum_nied_ms<-cbind(ag_menge,ms_menge,na.omit(hell$gew_mitt/10))
cum_nied_ms<-cbind(n_dates,cum_nied_ms)
colnames(cum_nied_ms)<-c("time","cum_nied_ag","cum_nied_ms","hellmann")

##=====
##Alle Daten zu Gesamtdatensatz-Zusammenführen
##=====
data_set_complete<-left_join(L_data1d, meteo_1d, suffix=c("x","y") , by="Date") %>%
  left_join(.,D_data1d, suffix=c("x","y") , by="Date")%>%
  left_join(.,tens_daily, suffix=c("x","y") , by="Date")%>%
  left_join(.,log_data_1d, suffix=c("x","y") , by="Date")%>%
  left_join(.,lysi_weight_daily, suffix=c("x","y") , by="Date") %>%
  left_join(.,pcare_daily, suffix=c("x","y") , by="Date") %>%
  left_join(.,fabo, suffix=c("x","y") , by="Date") %>%
  left_join(.,hyd_meteo, suffix=c("x","y") , by="Date") %>%
  left_join(.,hyd_T_d, suffix=c("x","y") , by="Date") %>%
  left_join(.,hyd_daily_tot, suffix=c("x","y") , by="Date")%>%
  left_join(.,hyd_exp_ON_d, suffix=c("x","y") , by="Date") %>%
  left_join(.,hyd_exp_T_d, suffix=c("x","y") , by="Date") %>%
  left_join(.,LAI, suffix=c("x","y") , by="Date")

data_set_fil<-data_set_complete %>% ##Auswahl Zeitraum
  filter(Date>="2018-01-01" & Date<=end_date)
z<-colnames(data_set_fil)

#####Berechnungen Wasserbilanz

bilanz<- data_set_fil%>%
  filter(Date>="2018-04-01" & Date<="2018-10-01")%>%
  mutate(bill1=max(na.omit(cumsum(L1_P_ts))+min(na.omit(cumsum(L1_ET_ts)))),
    bill2=max(na.omit(cumsum(L2_P_ts))+min(na.omit(cumsum(L2_ET_ts))))%>%
  dplyr::select("bill1", bill2)

## =====
###Lineare Modelle, um ET Variation zu erklären
## =====
# scatterplotMatrix(~sqrt(gre000d0)+ure200dn+tre200dn+tre200dx+log(fkl010d0), data=data_set_fil,
# diag="histogram")
# lm_ET_MS<-lm(data=data_set_fil, formula=erefaod0~sqrt(gre000d0)+ure200dn+tre200dn+tre200dx+log(fkl010d0))
# summary(lm_ET_MS)
# lm_ET1<-lm(data=data_set_fil, formula=L1_ET_ts~sqrt(gre000d0)+rka150d0+tre200d0+L1_TDR_W_030
# )
# summary(lm_ET1)
# lm_ET2<-lm(data=data_set_fil, formula=L2_ET_ts~sqrt(gre000d0)+rka150d0+tre200d0+L2_TDR_W_030
# )
# summary(lm_ET2)
#

## =====
##Grafiken
## =====

```

```
#####
##Lysimeter-Daten
#####
corr_L1_MS<-cor(x=data_set_fil$L1_P1d, y=data_set_fil$rka150d0, method="pearson")
corr_L2_MS<-cor(x=data_set_fil$L2_P1d, y=data_set_fil$rka150d0, method="pearson")
corr_L1_12<-cor(x=data_set_fil$L1_P_ts, y=data_set_fil$rka150d0, method="pearson", use="complete.obs")
corr_L2_12<-cor(x=data_set_fil$L2_P_ts, y=data_set_fil$rka150d0, method="pearson", use="complete.obs")
corr_L1_AM<-cor(x=data_set_fil$L1_P1d, y=data_set_fil$nied, method="pearson")
corr_L2_AM<-cor(x=data_set_fil$L2_P1d, y=data_set_fil$nied, method="pearson")
corr_p_lysi<-cor(x=data_set_fil$L2_P1d, y=L_data1d$L1_P1d, method="pearson")
corr_MS_AM<-cor(x=meteo_1d$rka150d0, y=meteo_1d$nied, method="pearson")
prec<-data.frame(meteo_1d$time,meteo_1d$rka150d0,meteo_1d$nied,L_data1d$L1_P1d,L_data1d$L2_P1d
)

q1<-ggplot()+ ##Grafik vergleich Lysimeter(AWAT) und Meteoschweiz Niederschlag
  geom_point(aes(x=L_data1d$L1_P1d, y=meteo_1d$rka150d0, shape="L1"),size=3)+
  geom_point(aes(x=L_data1d$L2_P1d, y=meteo_1d$rka150d0, shape="L2"),size=3)+
  scale_x_log10(name="Niederschlag Lysimeter (mm)",limits=c(0.1,100), breaks=c(1,10,100))+
  scale_y_log10(name="Niederschlag MeteoSchweiz (mm)",limits=c(0.1,100), breaks=c(0,1,10,100),
minor_breaks=scales::log_breaks(n=10))+
  geom_abline()+
  # annotate("text",hjust=0,size=5,label=paste("L 1 Pearson r = ",round(corr_L1_MS,2),"\nL 2
Pearson r = ",round(corr_L2_MS,2)),x=0.1,y=90)+
  # scale_color_manual(values=c("dark red", "dark green"),
  #                       name=NULL,
  #                       breaks=c("L1", "L2"))+
  guides(color=guide_legend("Lysimeter"), linetype=guide_legend("Lysimeter"),shape=guide_legend("Lysimeter"))+
  ggtitle("AWAT-Filter")+
  theme_bw(base_size = 17)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.3)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.4)),
        legend.position=c(.2,.9),
        legend.text = element_text(size=rel(1.4)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.4)),
        legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA),
        plot.title = element_text(size=rel(1.6)))

##Grafik vergleich Lysimeter(12_stunden Intervall) und Meteoschweiz Niederschlag
q2<-ggplot(data_set_fil)+
  geom_point(aes(x=L1_P_ts, y=rka150d0, shape="L1"),size=3, show.legend = F)+
  geom_point(aes(x=L2_P_ts, y=rka150d0, shape="L2"),size=3, show.legend = F)+
  scale_x_log10(name="Niederschlag Lysimeter (mm)",limits=c(0.1,100), breaks=c(1,10,100))+
  scale_y_log10(name="Niederschlag MeteoSchweiz (mm)",limits=c(0.1,100), breaks=c(0,1,10,100),
minor_breaks=scales::log_breaks(n=10))+
  geom_abline()+
  # annotate("text",hjust=0,size=5,label=paste("Lysimeter 1 Pearson r = ",round(corr_L1_12,2)
,"\nLysimeter 2 Pearson r = ",round(corr_L2_12,2)),x=0.1,y=90)+
  guides(color=guide_legend("Lysimeter"), linetype=guide_legend("Lysimeter"),shape=guide_legend("Lysimeter"))+
  ggtitle("12-Stunden Intervall")+
  theme_bw(base_size = 17)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.3)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.4)),
        legend.position=c(.2,.9),
        legend.text = element_text(size=rel(1.4)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.4)),
        legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA),
        plot.title = element_text(size=rel(1.6)))
nied_lysi<-plot_grid(q1,q2,ncol=2)
ggsave(nied_lysi, file="nied.jpg", width=32*1.25, height=16*1.25, units="cm", dpi=300)
nied_lysi
```

```

###Plot Niederschlagsmessung beider Meteostationen mit Pearson r
ggplot(meteo_1d)+
  geom_point(aes(x=rka150d0,y=nied)) +
  geom_point(data=meteo_full,aes(x=rre150h0,y=nied), color="red", alpha=0.3) +
  scale_x_log10(name="Niederschlag MeteoSchweiz (mm)",limits=c(NA,100), breaks=c(1,10,100))+
  scale_y_log10(name="Niederschlag Agrometeo (mm)",limits=c(NA,100))+
  geom_abline()+
  annotate("text",hjust=0, size=5, label=paste("Pearson r (stündliche Daten) = ",round(cor(meteo_full$rre150h0,meteo_full$nied, use="complete.obs"),2),
                                                "\nPearson r (tägliche Daten)      = ",round(cor(meteo_1d$rka150d0,meteo_1d$nied, use="complete.obs"),2)),x=0.1,y=75)+
  scale_colour_manual(values=c("black", "red"))+
  theme_bw()+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)))

###Abweichung Evapotranspiration zu FAO
err_ET_weekly<-data_set_fil %>%
  mutate(seven_day_index = 1:nrow(data_set_fil) %/% 7) %>%
  group_by(seven_day_index) %>%
  summarize_all(mean) %>%
  dplyr::select(c("Date", "L1_ET_ts", "L2_ET_ts", "erefaod0", "seven_day_index", "Ren_ET", "Ros_ETa", "RETc_ETa", "RETC_ETa"))%>%
  mutate(diff_FAO=L1_ET_ts*-1-erefaod0,
         diff_hyd=L1_ET_ts*-1-Ren_ET,
         diff_Ren_actual=L1_ET_ts*-1-Ren_ETa,
         diff_Ros_actual=L1_ET_ts*-1-Ros_ETa,
         diff_RETC_actual=L1_ET_ts*-1-RETC_ETa)

RMSE_ET_weekly<-err_ET_weekly %>%
  mutate(RMSE_FAO=sqrt(sum(diff_FAO^2, na.rm=T)/n()),
         RMSE_hyd=sqrt(sum(diff_hyd^2, na.rm=T)/n()),
         RMSE_Ren_ETa=sqrt(sum(diff_Ren_actual^2, na.rm=T)/n()),
         RMSE_Ros_ETa=sqrt(sum(diff_Ros_actual^2, na.rm=T)/n()),
         RMSE_RETC_ETa=sqrt(sum(diff_RETC_actual^2, na.rm=T)/n()))

err_ET_daily<-data_set_fil %>%
  dplyr::select(c("Date", "L1_ET_ts", "L2_ET_ts", "erefaod0", "Ren_ET", "Ros_ETa", "Ren_ETa", "RETc_ETa", "RETC_ETa"))%>%
  mutate(diff_FAO=L1_ET_ts*-1-erefaod0,
         diff_hyd=L1_ET_ts*-1-Ren_ET,
         diff_Ren_actual=L1_ET_ts*-1-Ren_ETa,
         diff_Ros_actual=L1_ET_ts*-1-Ros_ETa,
         diff_RETC_actual=L1_ET_ts*-1-RETC_ETa)

RMSE_ET_daily<-err_ET_daily %>%
  mutate(RMSE_FAO=sqrt(sum(diff_FAO^2, na.rm=T)/n()),
         RMSE_hyd=sqrt(sum(diff_hyd^2, na.rm=T)/n()),
         RMSE_Ren_ETa=sqrt(sum(diff_Ren_actual^2, na.rm=T)/n()),
         RMSE_Ros_ETa=sqrt(sum(diff_Ros_actual^2, na.rm=T)/n()),
         RMSE_RETC_ETa=sqrt(sum(diff_RETC_actual^2, na.rm=T)/n()))

r1<-ggplot(data_set_fil)+
  geom_col(data=err_ET_daily,aes(x=Date, y=diff_FAO, fill="täglich"))+
  geom_col(data=err_ET_weekly,aes(x=Date, y=diff_FAO, fill="wöchentlich (mittel)"), alpha=0.6)
+
  #geom_path(aes(x=Date, y=erefaod0, color="ETo"))+
  annotate("text", size=5.5, label=paste("RMSE (wöchentlich): ", round(RMSE_ET_weekly$RMSE_FAO[1],2)), hjust=0, x=as.POSIXct("2018-01-01"),y=4 )+
  annotate("text", size=5.5, label=paste("RMSE (täglich): ", round(RMSE_ET_daily$RMSE_FAO[1],2)), hjust=0, x=as.POSIXct("2018-01-01"),y=3.4 )+
  scale_y_continuous(name=expression(paste(Delta," (ET L - ETo FAO) (mm)")),limits=c(-4,4), breaks=c(-4,0,4))+
  scale_x_datetime(name=NULL, labels=NULL, date_breaks="1 month")+
  scale_fill_manual(values=c("grey18", "red"))+

```



```

guides(fill=guide_legend("Abweichung"))+
theme_bw()+
theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
legend.position="none",
legend.margin=margin(0,0,0,0),
legend.box.margin=margin(-5,-5,-5,-5),
legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))

r2<-ggplot(data_set_fil)+
  geom_col(data=err_ET_daily,aes(x=Date, y=diff_hyd, fill="täglich"))+
  geom_col(data=err_ET_weekly,aes(x=Date, y=diff_hyd, fill="wöchentlich (mittel)", alpha=0.6)
+
  #geom_path(aes(x=Date, y=erefaod0, color="ETo"))+
  annotate("text", size=5.5, label=paste("RMSE (wöchentlich): ", round(RMSE_ET_weekly$RMSE_hyd
[1],2)), hjust=0, x=as.POSIXct("2018-01-01"),y=4 )+
  annotate("text", size=5.5, label=paste("RMSE (täglich): ", round(RMSE_ET_daily$RMSE_hyd[1],2
)), hjust=0, x=as.POSIXct("2018-01-01"),y=3.4 )+
  scale_y_continuous(name=expression(paste(Delta," (ET L - ETp HYD) (mm)")),limits=c(-4,4), br
eaks=c(-4,0,4))+
  scale_x_datetime(date_labels="%b",name=NULL, date_breaks="1 month")+
  scale_fill_manual(values=c("grey18","red"))+
  guides(fill=guide_legend("Abweichung"))+
  theme_bw()+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
legend.position="none",
legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))

###Abweichung Evapotranspiration Lysi zu ROSETTA
p1<-ggplot(data_set_fil)+
  geom_col(data=err_ET_daily,aes(x=Date, y=diff_Ros_actual, fill="täglich"))+
  geom_col(data=err_ET_weekly,aes(x=Date, y=diff_Ros_actual, fill="wöchentlich (mittel)", alp
ha=0.6))+
  scale_y_continuous(limits=c(-4,4), breaks=c(-4,0,4),name=expression(paste(Delta," (ET L - ET
m) (mm)")))+
  annotate("text", size=5.5, label=paste("RMSE (wöch.): ", round(RMSE_ET_weekly$RMSE_Ros_ETa[1
],2)), hjust=0, x=as.POSIXct("2018-01-01"),y=-3.4 )+
  annotate("text", size=5.5, label=paste("RMSE (tägl.): ", round(RMSE_ET_daily$RMSE_Ros_ETa[1
],2)), hjust=0, x=as.POSIXct("2018-01-01"),y=-4 )+
  annotate("text", size=5.5, label="ROSETTA", hjust=0, x=as.POSIXct("2018-01-01"),y=4 )+
  scale_x_datetime(date_labels="%b",name=NULL,
breaks=seq.POSIXt(from=as.POSIXct("2018-01-01"),to=as.POSIXct("2018-11-01")
, by="2 month"))+
  scale_fill_manual(values=c("grey18","red"))+
  guides(fill=guide_legend("Abweichung"))+
  theme_bw()+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
legend.position="none",
legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))

###Abweichung Evapotranspiration Lysi zu Renger
p2<-ggplot(data_set_fil)+
  geom_col(data=err_ET_daily,aes(x=Date, y=diff_Ren_actual, fill="täglich"))+
  geom_col(data=err_ET_weekly,aes(x=Date, y=diff_Ren_actual, fill="wöchentlich (mittel)", alp
ha=0.6))+
  scale_y_continuous(limits=c(-4,4), breaks=c(-4,0,4),name=expression(paste(Delta," (ET L - ET

```

```

m) (mm)))+
  annotate("text", size=5.5, label=paste("RMSE (wöch.): ", round(RMSE_ET_weekly$RMSE_Ren_ETa[1
],2)), hjust=0, x=as.POSIXct("2018-01-01"),y=-3.4 )+
  annotate("text", size=5.5, label=paste("RMSE (tägl.): ", round(RMSE_ET_daily$RMSE_Ren_ETa[1
],2)), hjust=0, x=as.POSIXct("2018-01-01"),y=-4 )+
  annotate("text", size=5.5, label="Renger", hjust=0, x=as.POSIXct("2018-01-01"),y=4 )+
  scale_x_datetime(date_labels="%b", name=NULL,
    breaks=seq.POSIXt(from=as.POSIXct("2018-01-01"),to=as.POSIXct("2018-11-01")
, by="2 month"))+
  scale_fill_manual(values=c("grey18","red"))+
  guides(fill=guide_legend("Abweichung"))+
  theme_bw()+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
    axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
    legend.position="none",
    legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
    legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
    legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
    legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))
###Abweichung Evapotranspiration Lysi zu RETC
p3<-ggplot(data_set_fil)+
  geom_col(data=err_ET_daily,aes(x=Date, y=diff_RETC_actual, fill="täglich"))+
  geom_col(data=err_ET_weekly,aes(x=Date, y=diff_RETC_actual, fill="wöchentlich (mittel)", al
pha=0.6))+
  scale_y_continuous(limits=c(-4,4),name=expression(paste(Delta," (ET L - ETm) (mm)")))+
  annotate("text", size=5.5, label=paste("RMSE (wöch.): ", round(RMSE_ET_weekly$RMSE_RETC_ETa[
1],2)), hjust=0, x=as.POSIXct("2018-01-01"),y=-3.4 )+
  annotate("text", size=5.5, label=paste("RMSE (tägl.): ", round(RMSE_ET_daily$RMSE_RETC_ETa[1
],2)), hjust=0, x=as.POSIXct("2018-01-01"),y=-4 )+
  annotate("text", size=5.5, label="Wösten", hjust=0, x=as.POSIXct("2018-01-01"),y=4 )+
  scale_x_datetime(date_labels="%b", name=NULL,
    breaks=seq.POSIXt(from=as.POSIXct("2018-01-01"),to=as.POSIXct("2018-11-01")
, by="2 month"))+
  scale_fill_manual(values=c("grey18","red"))+
  guides(fill=guide_legend("Abweichung"))+
  theme_bw()+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
    axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
    legend.position="none",
    legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
    legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
    legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
    legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))
legy<-get_legend(ggplot(data_set_fil)+
  geom_col(data=err_ET_daily,aes(x=Date, y=diff_RETC_actual, fill="täglich"))
+
  geom_col(data=err_ET_weekly,aes(x=Date, y=diff_RETC_actual, fill="wöchentli
ch (mittel)", alpha=0.5))+
  scale_y_continuous(limits=c(-4,4),name=expression(paste(Delta," (ET L - ETa
Wösten) (mm)")))+
  scale_x_datetime(date_labels="%b", name=NULL,
    breaks=seq.POSIXt(from=as.POSIXct("2018-01-01"),to=as.POSI
Xct("2018-11-01"), by="2 month"))+
  scale_fill_manual(values=c("grey18","red"))+
  guides(fill=guide_legend("Abweichung"))+
  theme_bw()+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
    axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
    legend.position="right",
    legend.text = element_text(size=rel(1.3)),
    legend.title = element_text(size=rel(1.4)),
    legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
    legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA)))
plot_et_vergl<-plot_grid(r1,p1,p2,r2,p3,legy, ncol=3, nrow=2, rel_widths = c(2,1,1))

ggsave(plot_et_vergl, file="plot_et_vergl.jpg", width=32*1.25, height=16*1.25, units="cm", dpi=
300)
plot_et_vergl

```



```

#####ET Lysimeter
ggplot(data_set_fil)+ ##Grafik korrelation ET-Daten Lysimeter (12-Stunden Intervall)
  geom_point(aes(x=L1_ET_ts*-1,y=L2_ET_ts*-1))+
  geom_abline()+
  annotate("text",hjust=0, size=5,label=paste("Pearson r =",round(cor(data_set_fil$L1_ET_ts,da
ta_set_fil$L2_ET_ts, method="pearson", use="complete.obs"),2)),
    x=0,y=7.5)+
  scale_y_continuous(name="ET L1 (mm)",limits=c(NA,8))+
  scale_x_continuous(name="ET L2 (mm)",limits=c(NA,8))+
  theme_bw()+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
    axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
    legend.position=c(.2,.75),
    legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
    legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
    legend.spacing = unit(0.2,"cm"))

lysi_et1<-ggplot(data_set_fil)+ ##Verlauf ET-Daten Lysimeter (12-Stunden Intervall)
  geom_col(aes(x=Date,y=L1_ET_ts*-1, color="Tageswerte"), fill="grey18")+
  geom_path(data=err_ET_weekly,aes(x=err_ET_weekly$Date, y=err_ET_weekly$L1_ET_ts*-1, color="w
öchentliches Mittel"), size=1)+
  scale_y_continuous(name="ET L1 (mm)",limits=c(NA,8))+
  scale_x_datetime(name=NULL)+
  scale_color_manual(values=c("grey18","wöchentliches Mittel"="red"))+
  scale_linetype_manual(values=c(L1="solid",L2="dotted"))+
  guides(color=guide_legend("", override.aes=list(shape=c(1,1),fill="white")))+
  theme_bw()+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
    axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
    legend.position="none",
    legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
    legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
    legend.spacing = unit(0.2,"cm"))

lysi_et2<-ggplot(data_set_fil)+ ##Verlauf ET-Daten Lysimeter (12-Stunden Intervall)
  geom_col(aes(x=Date,y=L2_ET_ts*-1, color="Tageswerte"), fill="grey18")+
  geom_path(data=err_ET_weekly,aes(x=err_ET_weekly$Date, y=err_ET_weekly$L2_ET_ts*-1, color="w
öchentliches Mittel"), size=1)+
  # annotate("text",hjust=0, size=5,label=paste("Pearson r =",round(cor(data_set_fil$L1_ET_ts
,data_set_fil$L2_ET_ts, method="pearson", use="complete.obs"),2)),
  # x=0,y=7.5)+
  scale_y_continuous(name="ET L2 (mm)",limits=c(NA,8))+
  scale_x_datetime(name=NULL)+
  scale_color_manual(values=c("grey18","red"))+
  guides(color=guide_legend("", override.aes=list(shape=c(1,1),fill="white")))+
  theme_bw()+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
    axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
    legend.position="none",
    legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
    legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
    legend.spacing = unit(0.2,"cm"))

etlys_leg<-get_legend(ggplot(data_set_fil)+ ##Verlauf ET-Daten Lysimeter (12-Stunden Intervall)
  geom_col(aes(x=Date,y=L1_ET_ts*-1, color="Tageswerte"), fill="grey18")
+
  geom_path(data=err_ET_weekly,aes(x=err_ET_weekly$Date, y=err_ET_weekly
$L1_ET_ts*-1, color="wöchentliches Mittel"), size=1)+
  scale_y_continuous(name="ET L1 (mm)",limits=c(NA,8))+
  scale_x_datetime(name=NULL)+
  scale_color_manual(values=c("grey18","red"))+
  guides(color=guide_legend("", override.aes=list(shape=c(1,1),fill="whi
te")))+
  theme_bw()+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
    axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
    legend.position="bottom",

```

```

        legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
        legend.spacing = unit(0.2, "cm"))
lysi_et<-plot_grid(lysi_et1,lysi_et2, ncol=2)
plot_grid(lysi_et,etlys_leg, nrow=2, rel_heights = c(1,0.1))
lysi_et

##Grafik Verlauf Drain-Daten Lysimeter (12-Stunden Intervall)
drain_verlauf<-lysi_weight_daily%>%
  filter(Date>="2018-01-01" & Date<="2018-11-01")%>%
  ggplot(.)+
  geom_path(aes(x=Date,y=(L1_D_delta_ts), color="L1"),size=1)+
  geom_path(aes(x=Date,y=(L2_D_delta_ts), color="L2"),size=1)+
  annotate("text",hjust=0,size=6,label=paste("Max L1= ",round(max(na.omit(lysi_weight_daily$L1
_D_delta_ts)),1)," mm", sep = ""),
  x=as.POSIXct("2018-02-01"),y=40)+
  annotate("text",hjust=0,size=6,label=paste("Max L2= ",round(max(na.omit(lysi_weight_daily$L2
_D_delta_ts)),1)," mm", sep = ""),
  x=as.POSIXct("2018-02-01"),y=25)+
  scale_y_continuous(name="Drainage (mm)")+
  scale_x_datetime(date_labels="%b",name=NULL,
    breaks=seq.POSIXt(from=as.POSIXct("2018-01-01"),to=as.POSIXct("2018-11-01")
, by="2 month"))+
  scale_color_manual(values=c("red","black"))+
  guides(color=guide_legend(""))+
  theme_bw(base_size = 17)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
    axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
    legend.position=c(.8,.9),
    legend.text = element_text(size=rel(1.2)),
    legend.title = element_text(size=rel(1.3)),
    legend.spacing = unit(0.2, "cm"),
    legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))
ggsave(drain_verlauf, file="drain_verlauf.jpg", width=16*1.25, height=16*1.25, units="cm", dpi=
300)

```

###Grafik kum. Niederschlagsmenge Vergleich Lysi und Meteodaten + Hellmann

```

L1_cum_nied<-cumsum(data_set_fil$L1_P_ts)
L2_cum_nied<-cumsum(data_set_fil$L2_P_ts)

kum_nied_plot<-ggplot(data_set_fil)+
  geom_path(aes(x=Date,y=cumsum(L1_P_ts), linetype="L1"), size=1)+
  geom_path(aes(x=Date,y=cumsum(L2_P_ts), linetype="L2"), size=1)+
  geom_path(aes(x=Date, y=cumsum(rka150d0), color="MS"), size=1)+
  geom_path(aes(x=Date, y=cumsum(nied), color="AM"), size=1)+
  geom_point(data=hell,aes(x=hell$time,y=hell$hell_nied_cum+505, shape="Hellmann"), color="blu
e")+
  scale_y_continuous(name="Niederschlagsmenge kumuliert (mm)", breaks=c(seq(from=0,to=1100,by=
100)))+
  scale_x_datetime(date_labels="%b",name=NULL, breaks=seq.POSIXt(from=as.POSIXct("2018-01-01")
,to=as.POSIXct("2018-11-01"), by="2 month"))+
  scale_color_manual(values=c("dark red", "dark green", "blue"),
    name=NULL,
    breaks=c("MS", "AM", "Hellmann"))+
  guides(color=guide_legend("Meteodaten"), linetype=guide_legend("Lysimeter"),shape=guide_lege
nd("Regenmesser"))+
  theme_bw(base_size=16)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
    axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
    legend.position=c(.2,.75),
    legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
    legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
    legend.spacing = unit(0.2, "cm"))
ggsave(kum_nied_plot, file="kum_nied_plot.jpg", width=16*1.25, height=16*1.25, units="cm", dpi=
300)
kum_nied_plot

```

```
#####
####Hydrus-Output
#####

#### Hydrus Output Observation Nodes
####Berechnung RMSE Wassergehalts-Verlauf der einzelnen Modell-Outputs
farben=c(Renger="blue",Wösten="dark orange",ROSETTA="dark green")
mod_select<-c("Ren")      ##Modell Wählen
hyd_daily<-hyd_daily_tot %>%
  dplyr::select(Date,c(grep(pattern=mod_select, x=colnames(hyd_daily_tot))))

RMSE_data<-cbind(tens_daily_fil$Date,tens_daily_fil[,25:30],
  hyd_daily[[paste(mod_select,"_theta_5", sep="")]],
  hyd_daily[[paste(mod_select,"_theta_10", sep="")]],
  hyd_daily[[paste(mod_select,"_theta_20", sep="")]],
  hyd_daily[[paste(mod_select,"_theta_30", sep="")]],
  hyd_daily[[paste(mod_select,"_theta_40", sep="")]])

colnames(RMSE_data)[8:12]<-c("theta_5","theta_10","theta_20","theta_30","theta_40")

RMSE_data<-RMSE_data%>%
  mutate(diff_L1_5=(theta_5-L1_TDR_W_005/100)^2,diff_L2_5=(theta_5-L2_TDR_W_005/100)^2,
    diff_L1_10=(theta_10-L1_TDR_W_010/100)^2,diff_L2_10=(theta_10-L2_TDR_W_010/100)^2,
    diff_L1_30=(theta_30-L1_TDR_W_030/100)^2, diff_L2_30=(theta_30-L2_TDR_W_030/100)^2)

assign(paste("RMSE_",mod_select,sep=""),data.frame(RMSE_L1_d5=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L1
_5)/nrow(RMSE_data)),2),
  RMSE_L2_d5=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L2
_5)/nrow(RMSE_data)),2),
  RMSE_L1_d10=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L
1_10)/nrow(RMSE_data)),2),
  RMSE_L2_d10=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L
2_10)/nrow(RMSE_data)),2),
  RMSE_L1_d30=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L
1_30)/nrow(RMSE_data)),2),
  RMSE_L2_d30=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L
2_30)/nrow(RMSE_data)),2)))

mod_select<-c("RET")      ##Modell Wählen
hyd_daily<-hyd_daily_tot %>%
  dplyr::select(Date,c(grep(pattern=mod_select, x=colnames(hyd_daily_tot))))

RMSE_data<-cbind(tens_daily_fil$Date,tens_daily_fil[,25:30],
  hyd_daily[[paste(mod_select,"_theta_5", sep="")]],
  hyd_daily[[paste(mod_select,"_theta_10", sep="")]],
  hyd_daily[[paste(mod_select,"_theta_20", sep="")]],
  hyd_daily[[paste(mod_select,"_theta_30", sep="")]],
  hyd_daily[[paste(mod_select,"_theta_40", sep="")]])

colnames(RMSE_data)[8:12]<-c("theta_5","theta_10","theta_20","theta_30","theta_40")

RMSE_data<-RMSE_data%>%
  mutate(diff_L1_5=(theta_5-L1_TDR_W_005/100)^2,diff_L2_5=(theta_5-L2_TDR_W_005/100)^2,
    diff_L1_10=(theta_10-L1_TDR_W_010/100)^2,diff_L2_10=(theta_10-L2_TDR_W_010/100)^2,
    diff_L1_30=(theta_30-L1_TDR_W_030/100)^2, diff_L2_30=(theta_30-L2_TDR_W_030/100)^2)

assign(paste("RMSE_",mod_select,sep=""),data.frame(RMSE_L1_d5=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L1
_5)/nrow(RMSE_data)),2),
  RMSE_L2_d5=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L2
_5)/nrow(RMSE_data)),2),
  RMSE_L1_d10=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L
1_10)/nrow(RMSE_data)),2),
  RMSE_L2_d10=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L
2_10)/nrow(RMSE_data)),2),
  RMSE_L1_d30=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L
1_30)/nrow(RMSE_data)),2),
  RMSE_L2_d30=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L
2_30)/nrow(RMSE_data)),2)))
```

```

mod_select<-c("Ros") ##Modell Wählen
hyd_daily<-hyd_daily_tot %>%
  dplyr::select(Date,c(grep(pattern=mod_select, x=colnames(hyd_daily_tot))))

RMSE_data<-cbind(tens_daily_fil$Date,tens_daily_fil[,25:30],
  hyd_daily[[paste(mod_select,"_theta_5", sep="")]],
  hyd_daily[[paste(mod_select,"_theta_10", sep="")]],
  hyd_daily[[paste(mod_select,"_theta_20", sep="")]],
  hyd_daily[[paste(mod_select,"_theta_30", sep="")]],
  hyd_daily[[paste(mod_select,"_theta_40", sep="")]])

colnames(RMSE_data)[8:12]<-c("theta_5","theta_10","theta_20","theta_30","theta_40")

RMSE_data<-RMSE_data%>%
  mutate(diff_L1_5=(theta_5-L1_TDR_W_005/100)^2,diff_L2_5=(theta_5-L2_TDR_W_005/100)^2,
    diff_L1_10=(theta_10-L1_TDR_W_010/100)^2,diff_L2_10=(theta_10-L2_TDR_W_010/100)^2,
    diff_L1_30=(theta_30-L1_TDR_W_030/100)^2, diff_L2_30=(theta_30-L2_TDR_W_030/100)^2)

assign(paste("RMSE_",mod_select,sep=""),data.frame(RMSE_L1_d5=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L1_5)/nrow(RMSE_data)),2),
  RMSE_L2_d5=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L2_5)/nrow(RMSE_data)),2),
  RMSE_L1_d10=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L1_10)/nrow(RMSE_data)),2),
  RMSE_L2_d10=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L2_10)/nrow(RMSE_data)),2),
  RMSE_L1_d30=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L1_30)/nrow(RMSE_data)),2),
  RMSE_L2_d30=round(sqrt(sum(RMSE_data$diff_L2_30)/nrow(RMSE_data)),2)))

###Grafiken
x1<-ggplot(data=data_set_fil)+
  geom_path(aes(x=Date,y=Ren_theta_5, color="Renger"), size=1.0)+
  geom_path(aes(x=Date,y=Ros_theta_5, color="ROSETTA"), size=1.0)+
  geom_path(aes(x=Date,y=RETC_theta_5, color="Wösten"), size=1.0)+
  geom_path(aes(x=Date,y=L1_TDR_W_005/100, linetype="L1"), size=1.0)+
  geom_path(aes(x=Date,y=L2_TDR_W_005/100, linetype="L2"), size=1.0)+
  scale_y_continuous(name="Theta 5cm",limits=c(0,0.5))+
  scale_x_datetime(name=NULL, label=NULL, limits=c(as.POSIXct(start_date),as.POSIXct(end_date)))
)+
  # annotate("text",hjust = 0,label=paste("RMSE L1 / L2", "\nRenger ",RMSE_Ren$RMSE_L1_d5,"/",RMSE_Ren$RMSE_L2_d5,
  # "\nROSETTA ",RMSE_Ros$RMSE_L1_d5,"/",RMSE_Ros$RMSE_L2_d5,
  # "\nRETC ",RMSE_RETC$RMSE_L1_d5,"/",RMSE_RETC$RMSE_L2_d5),
  # x=as.POSIXct("2018-01-10"),y=0.15)+
  scale_color_manual(values=farben)+
  scale_linetype_manual(values=c("L1"="solid","L2"="dashed"))+
  guides(color=guide_legend(""), linetype=guide_legend(""))+
  theme_bw()+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.4)),
    axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
    legend.position="top",
    legend.margin=margin(0,0,0,0),
    plot.margin = unit(c(0.2,0,0,0), "cm"),
    legend.box.margin=margin(-5,-5,-5,-5),
    legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
    legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
    legend.spacing = unit(0.0,"cm"),
    legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))
text1<-ggplot(data=data_set_fil)+
  geom_path(aes(x=Date,y=Ren_theta_30), color="transparent", size=1.0)+
  scale_y_continuous(name="Theta 30cm",limits=c(0,0.5))+
  scale_x_datetime(name=NULL,date_labels = "%b",breaks=c(seq.POSIXt(from=start_date, to=end_date, by="1 month")), limits=c(as.POSIXct(start_date),as.POSIXct(end_date)))+
  annotate("text",size=4.5,vjust=0,hjust = 0,label=paste("RMSE L1 / L2", "\nRenger ",RMSE_Ren$RMSE_L1_d5,"/",RMSE_Ren$RMSE_L2_d5,
  "\nROSETTA ",RMSE_Ros$RMSE_L1_d5,"/",RMSE_Ros$RMSE_L2_d5,
  "\nRETC ",RMSE_RETC$RMSE_L1_d5,"/",RMSE_RETC$RMSE_L2_d5),
  x=as.POSIXct("2018-01-10"),y=0.15)

```

```
MSE_L1_d5, "/" , RMSE_Ren$RMSE_L2_d5,
RMSE_L2_d5,
$RMSE_L2_d5),
    x=as.POSIXct(start_date),y=0.1)+
theme(panel.grid.major = element_blank(),
panel.grid.minor = element_blank(),
axis.text=element_blank(),
panel.border = element_blank(),
axis.line = element_blank(),
plot.margin = unit(c(0,0,0,0), "cm"),
axis.ticks = element_blank(),
axis.title=element_blank(),
legend.position="none",
legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))

x2<-ggplot(data=data_set_fil)+
geom_path(aes(x=Date,y=Ren_theta_10, color="Renger"), size=1.0)+
geom_path(aes(x=Date,y=Ros_theta_10, color="ROSETTA"), size=1.0)+
geom_path(aes(x=Date,y=RETC_theta_10, color="Wösten"), size=1.0)+
geom_path(aes(x=Date,y=L1_TDR_W_010/100, linetype="L1"), size=1.0)+
geom_path(aes(x=Date,y=L2_TDR_W_010/100, linetype="L2"), size=1.0)+
scale_y_continuous(name="Theta 10cm",limits=c(0,0.5))+
scale_x_datetime(name=NULL, label=NULL, limits=c(as.POSIXct(start_date),as.POSIXct(end_date)
)))+
# annotate("text",hjust = 0,label=paste("RMSE L1 / L2", "\nRenger ", RMSE_Ren$RMSE_L1_d10, "/",
RMSE_Ren$RMSE_L2_d10,
# "\nROSETTA ", RMSE_Ros$RMSE_L1_d10, "/", RMSE_Ros$RMSE_
L2_d10,
# "\nRETC ", RMSE_RETC$RMSE_L1_d10, "/", RMSE_RETC$RMSE_L
2_d10),
# x=as.POSIXct("2018-01-10"),y=0.15)+
scale_color_manual(values=farben)+
scale_linetype_manual(values=c("L1"="solid","L2"="dashed"))+
guides(color=guide_legend("HYDRUS"), linetype=guide_legend("Lysimeter"))+
theme_bw()+
theme(axis.text=element_text(size=rel(1.4)),
axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
plot.margin = unit(c(0,0,0,0), "cm"),
legend.position="none",
legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))

text2<-ggplot(data=data_set_fil)+
geom_path(aes(x=Date,y=Ren_theta_30), color="transparent", size=1.0)+
scale_y_continuous(name="Theta 30cm",limits=c(0,0.5))+
scale_x_datetime(name=NULL,date_labels = "%b",breaks=c(seq.POSIXt(from=start_date, to=end_da
te, by="1 month")), limits=c(as.POSIXct(start_date),as.POSIXct(end_date)))+
annotate("text",size=4.5,vjust=0,hjust = 0,label=paste("RMSE L1 / L2", "\nRenger ", RMSE_Ren$R
MSE_L1_d10, "/", RMSE_Ren$RMSE_L2_d10,
"\nROSETTA ", RMSE_Ros$RMSE_L1_d10, "/", RMSE_Ros
$RMSE_L2_d10,
"\nWösten ", RMSE_RETC$RMSE_L1_d10, "/", RMSE_RET
C$RMSE_L2_d10),
    x=as.POSIXct(start_date),y=0.1)+
theme(panel.grid.major = element_blank(),
panel.grid.minor = element_blank(),
panel.border = element_blank(),
axis.text=element_blank(),
plot.margin = unit(c(0,0,0,0), "cm"),
axis.line = element_blank(),
axis.ticks = element_blank(),
axis.title=element_blank(),
legend.position="none",
legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))
```



```
x3<-ggplot(data=data_set_fil)+
geom_path(aes(x=Date,y=Ren_theta_30, color="Renger"), size=1.0)+
geom_path(aes(x=Date,y=Ros_theta_30, color="ROSETTA"), size=1.0)+
geom_path(aes(x=Date,y=RETC_theta_30, color="Wösten"), size=1.0)+
geom_path(aes(x=Date,y=L1_TDR_W_030/100, linetype="L1"), size=1.0)+
geom_path(aes(x=Date,y=L2_TDR_W_030/100, linetype="L2"), size=1.0)+
scale_y_continuous(name="Theta 30cm",limits=c(0,0.5))+
scale_x_datetime(name=NULL,date_labels = "%b",breaks=c(seq.POSIXt(from=start_date, to=end_da
te, by="1 month")), limits=c(as.POSIXct(start_date),as.POSIXct(end_date)))+
# annotate("text",hjust = 0,label=paste("RMSE L1 / L2","\nRenger ",RMSE_Ren$RMSE_L1_d30,"/"
,RMSE_Ren$RMSE_L2_d30,
# "\nROSETTA ",RMSE_Ros$RMSE_L1_d30,"/",RMSE_Ros$RMSE_L2_d30,
# "\nRETC ",RMSE_RETC$RMSE_L1_d30,"/",RMSE_RETC$RMSE_L2_d30)),
# x=as.POSIXct(start_date),y=0.15)+
scale_color_manual(values=farben)+
scale_linetype_manual(values=c("L1"="solid","L2"="dashed"))+
guides(color=guide_legend("HYDRUS"), linetype=guide_legend("Lysimeter"))+
theme_bw()+
theme(axis.text=element_text(size=rel(1.4)),
plot.margin = unit(c(0,0,0,0), "cm"),
axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
legend.position="none",
legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))
text3<-ggplot(data=data_set_fil)+
geom_path(aes(x=Date,y=Ren_theta_30), color="transparent", size=1.0)+
scale_y_continuous(name="Theta 30cm",limits=c(0,0.5))+
scale_x_datetime(name=NULL,date_labels = "%b",breaks=c(seq.POSIXt(from=start_date, to=end_da
te, by="1 month")), limits=c(as.POSIXct(start_date),as.POSIXct(end_date)))+
annotate("text",size=4.5,vjust=0,hjust = 0,label=paste("RMSE L1 / L2","\nRenger ",RMSE_Ren$R
MSE_L1_d30,"/",RMSE_Ren$RMSE_L2_d30,
"\nROSETTA ",RMSE_Ros$RMSE_L1_d30,"/",RMSE_Ros
$RMSE_L2_d30,
"\nWösten ",RMSE_RETC$RMSE_L1_d30,"/",RMSE_RET
C$RMSE_L2_d30),
x=as.POSIXct(start_date),y=0.1)+
theme_bw()+
theme(panel.grid.major = element_blank(),
panel.grid.minor = element_blank(),
panel.border = element_blank(),
axis.text=element_blank(),
axis.line = element_blank(),
axis.ticks = element_blank(),
axis.title=element_blank(),
plot.margin = unit(c(0,0,0.6,0), "cm"),
legend.position="none",
legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))
WG_plot<-plot_grid(x1,text1,x2,text2,x3,text3,ncol=2,nrow=3, rel_widths = c(3,1), rel_heights
= c(1,1,1))
ggsave(WG_plot, file="WG_plot_apr.jpg", width=25*1.25, height=16*1.25, units="cm", dpi=300)
ggsave(WG_plot, file="WG_plot_apr_poster.jpg", width=20*1.25, height=16*1.25, units="cm", dpi=3
00)
WG_plot

plot_drain<-data_set_fil %>%
filter(Date>="2018-01-01"& Date<="2018-11-01")%>%
ggplot(.)+ ###Vergleich Drainage Lysi/Modelle (kumuliert)
geom_path(aes(x=Date, y=cumsum(Ren_vBot*10),color="Renger"), size=1)+
geom_path(aes(x=Date, y=cumsum(Ros_vBot*10),color="ROSETTA"), size=1)+
geom_path(aes(x=Date, y=cumsum(RETC_vBot*10),color="Wösten"), size=1)+
geom_path(aes(x=Date, y=cumsum(L1_D_delta_ts)*-1, linetype="L1"), size=1)+
geom_path(aes(x=Date, y=cumsum(L2_D_delta_ts)*-1, linetype="L2"), size=1)+
scale_y_continuous(name="kumulierte Drainwassermenge (mm)", limits=c(-300,0), breaks=c(-300,
-200,-100,0))+
scale_x_datetime(name=NULL, date_labels = "%b", breaks=c(seq.POSIXt(from=start_date, to=end_
date, by="2 month")), limits=c(as.POSIXct(start date),as.POSIXct(end date)))+
```

```

scale_color_manual(values=farben)+
scale_linetype_manual(values=c("L1"="solid", "L2"="dashed"))+
guides(color=guide_legend("HYDRUS"), linetype=guide_legend("Lysimeter"))+
theme_bw(base_size = 17)+
theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
      axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
      legend.position=c(.8,.8),
      legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
      legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
      legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
      legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))
ggsave(plot_drain, file="plot_drain.jpg", width=16*1.25, height=16*1.25, units="cm", dpi=300)
max(na.omit(cumsum(data_set_fil$L1_D_delta_ts)))
max(na.omit(cumsum(data_set_fil$L2_D_delta_ts)))
min(cumsum(data_set_fil$Ren_vBot*10))
min(cumsum(data_set_fil$Ros_vBot*10))
min(cumsum(data_set_fil$RETC_vBot*10))
plot_drain

###Vergleich ETa-Hydrus / Lysimeter ET
plot_cumET<-data_set_fil %>%
  filter(Date>="2018-01-01"& Date<="2018-10-31")%>%
  ggplot(.)+
  geom_path(aes(x=Date, y=cumsum(Ren_ETa),color="Renger"), size=1)+
  geom_path(aes(x=Date, y=cumsum(Ros_ETa),color="ROSETTA"), size=1)+
  geom_path(aes(x=Date, y=cumsum(RETC_ETa),color="Wösten"), size=1)+
  geom_path(aes(x=Date, y=cumsum(L1_ET_ts)*-1, linetype="L1"), size=1)+
  geom_path(aes(x=Date, y=cumsum(L2_ET_ts)*-1, linetype="L2"), size=1)+
  scale_y_continuous(name="kumulierte ET (mm)", limits=c(0,700), breaks=c(0,150,300,450,600, 7
00))+
  scale_x_datetime(name=NULL, date_labels = "%b", breaks = seq.POSIXt(from=start_date,to=end_d
ate,by="2 month"), limits=c(as.POSIXct(start_date),as.POSIXct(end_date)))+
  scale_color_manual(values=c(Renger="blue",Wösten="dark orange",ROSETTA="dark green"))+
  scale_linetype_manual(values=c("L1"="solid", "L2"="dashed"))+
  guides(color=guide_legend("HYDRUS"), linetype=guide_legend("Lysimeter"))+
  theme_bw(base_size = 17)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
        legend.position=c(.2,.8),
        legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
        legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))
ggsave(plot_cumET, file="plot_cumET.jpg", width=16*1.25, height=16*1.25, units="cm", dpi=300)
plot_cumET

###Vergleich veränderung Wasservorrat im Boden Lysi/Modelle
bowavo<-data_set_fil %>%
  filter(Date>="2018-04-01"& Date<="2018-11-01")%>%
  ggplot(.)+
  geom_path(aes(x=Date, y=cumsum((RETC_ETa*-1+RETC_vBot*10+RETC_Infil_a)),color="Wösten"),size
=1)+
  geom_path(aes(x=Date, y=cumsum((Ros_ETa*-1+Ros_vBot*10+Ros_Infil_a)),color="ROSETTA"),size=1
)+
  geom_path(aes(x=Date, y=cumsum((Ren_ETa*-1+Ren_vBot*10+Ren_Infil_a)),color="Renger"),size=1)
+
  geom_path(aes(x=Date, y=(cumsum(L1_P_ts-L1_ET_ts*-1-L1_D_delta_ts)), linetype="L1"),size=1)
+
  geom_path(aes(x=Date, y=(cumsum(L2_P_ts-L2_ET_ts*-1-L2_D_delta_ts)), linetype="L2"),size=1)+
  scale_y_continuous(name=expression(paste("aufsummierte Speicheränderung ",Delta,"S (mm)"))
)+
  scale_x_datetime(name=NULL, date_labels = "%b",breaks=seq.POSIXt(from=as.POSIXct("2018-04-01
"), to=end_date, by="1 month"))+
  scale_color_manual(values=farben)+
  scale_linetype_manual(values=c("L1"="solid", "L2"="dashed"))+
  guides(color=guide_legend(""), linetype=guide_legend(""))+
  theme_bw(base_size = 17)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),

```

```

axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
legend.margin=margin(0,0,0,0),
legend.box.margin=margin(-5,-5,-5,-5),
legend.position="top",
legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))
ggsave(bowavo, file="bowavo.jpg", width=16*1.25, height=16*1.25, units="cm", dpi=300)
bowavo

###Vergleich totale Evaporation Modelle
et1<-data_set_fil %>%
  filter(Date>="2018-01-01"& Date<="2018-11-01")%>%
  ggplot(.)+
  geom_col(aes(x=Date, y=((RETC_ETa)),fill="ET", color="ET"),size=0.5)+
  geom_col(aes(x=Date, y=((RETC_Evap_a)),fill="E", color="E"),size=0.5)+
  scale_y_continuous(name="ET und E (mm)", limits=c(0,6))+
  scale_x_datetime(name=NULL, labels = NULL,breaks=c(seq.POSIXt(from=start_date, to=end_date,
by="3 month")))+
  scale_fill_manual(values=c("ET"="forestgreen", "E"="tan4"))+
  scale_color_manual(values=c("ET"="forestgreen", "E"="tan4"))+
  guides(color=guide_legend(""), fill=guide_legend(""))+
  theme_bw()+
  labs(title="Wösten")+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
plot.title = element_text(size=rel(1.5)),
legend.margin=margin(0,0,0,0),
legend.box.margin=margin(-5,-5,-5,-5),
legend.position="none",
legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))

et2<-data_set_fil %>%
  filter(Date>="2018-01-01"& Date<="2018-11-01")%>%
  ggplot(.)+
  geom_col(aes(x=Date, y=((Ros_ETa)),fill="ET", color="ET"),size=0.5)+
  geom_col(aes(x=Date, y=((Ros_Evap_a)),fill="E", color="E"),size=0.5)+
  scale_y_continuous(name="ET und E (mm)", limits=c(0,6))+
  scale_x_datetime(name=NULL, labels = NULL,breaks=c(seq.POSIXt(from=start_date, to=end_date,
by="3 month")))+
  scale_fill_manual(values=c(ET="forestgreen", E="tan4"))+
  scale_color_manual(values=c(ET="forestgreen", E="tan4"))+
  guides(color=guide_legend(""), fill=guide_legend(""))+
  theme_bw()+
  labs(title="ROSETTA")+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
plot.title = element_text(size=rel(1.5)),
legend.margin=margin(0,0,0,0),
legend.box.margin=margin(-5,-5,-5,-5),
legend.position="none",
legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))

et3<-data_set_fil %>%
  filter(Date>="2018-01-01"& Date<="2018-11-01")%>%
  ggplot(.)+
  geom_col(aes(x=Date, y=((Ren_ETa)),fill="ET", color="ET"),size=0.5)+
  geom_col(aes(x=Date, y=((Ren_Evap_a)),fill="E", color="E"),size=0.5)+
  scale_y_continuous(name="ET und E (mm)", limits=c(0,6))+
  scale_x_datetime(name=NULL, date_labels = "%b",breaks=c(seq.POSIXt(from=start_date, to=end_d
ate, by="2 month")))+
  scale_fill_manual(values=c(ET="forestgreen", E="tan4"))+

```



```

scale_color_manual(values=c(ET="forestgreen",E="tan4"))+
guides(color=guide_legend(""), fill=guide_legend(""))+
theme_bw()+
labs(title="Renger")+
theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
      axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
      plot.title = element_text(size=rel(1.5)),
      legend.margin=margin(0,0,0,0),
      legend.box.margin=margin(-5,-5,-5,-5),
      legend.position="none",
      legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
      legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
      legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
      legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))
et_leg<-get_legend(data_set_fil %>%
  filter(Date>="2018-01-01"& Date<="2018-11-01")%>%
  ggplot(.)+
  geom_col(aes(x=Date, y=((Ren_ETa)),fill="Evapotranspiration", color="Evap
otranspiration"),size=0.5)+
  geom_col(aes(x=Date, y=((Ren_Evap_a)),fill="Evaporation", color="Evaporat
ion"),size=0.5)+
  scale_y_continuous(name="ET und E (mm)", limits=c(0,6))+
  scale_x_datetime(name=NULL, date_labels = "%b",breaks=c(seq.POSIXt(from=s
tart_date, to=end_date, by="3 month")))+
  scale_fill_manual(values=c(Evapotranspiration="forestgreen",Evaporation="
tan4"))+
  scale_color_manual(values=c(Evapotranspiration="forestgreen",Evaporation=
"tan4"))+
  guides(color=guide_legend(""), fill=guide_legend(""))+
  theme_bw()+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
        legend.margin=margin(0,0,0,0),
        legend.box.margin=margin(-5,-5,-5,-5),
        legend.position="bottom",
        legend.text = element_text(size=rel(1.5)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.5)),
        legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA)))

et_mod<-plot_grid(et2,et1,et3, et_leg, ncol=1, nrow=4, rel_heights = c(1,1,1,0.2))
ggsave(et_mod, file="et_mod.jpg", width=16*1.25, height=32*1.25, units="cm", dpi=300)
et_mod

```

####Vergleich Saugsspannungsdaten Exposition

```

err_h_exp<-data_set_fil %>%
  dplyr::select(c("Date", "N_h_20", "N_h_40", "O_h_20", "O_h_40", "N_Ob", "N_Ub", "O_Ob", "O_Ub"))%>%
  na.omit()%>%
  filter(Date>=as.POSIXct("2018-09-01"))%>%
  mutate(RMSE_N_Ob=round(sqrt(sum((N_Ob*-1-N_h_20)^2, na.rm=T)/n()),0),
         RMSE_N_Ub=round(sqrt(sum((N_Ub*-1-N_h_40)^2, na.rm=T)/n()),0),
         RMSE_O_Ob=round(sqrt(sum((O_Ob*-1-O_h_20)^2, na.rm=T)/n()),0),
         RMSE_O_Ub=round(sqrt(sum((O_Ub*-1-O_h_40)^2, na.rm=T)/n()),0))

```

```

nob<-ggplot(data=data_set_fil)+ ####Vergleich Saugsspannungsdaten Exposition Nord Oberboden
  geom_path(aes(x=Date,y=N_h_20, color="HYDRUS", size=1))+
  geom_path(aes(x=Date,y=N_Ob*-1, color="T8", size=1))+
  annotate("text",size=5,hjust=0, label=paste("RMSE:",err_h_exp$RMSE_N_Ob[1],"hPa"),x=as.POSIX
ct("2018-09-01"),y=-600)+
  scale_y_continuous(limits=c(-750,0), name="Oberboden (hPa))+
  scale_x_datetime(limits=c(as.POSIXct("2018-09-01"),as.POSIXct("2018-10-31")),name=NULL, labe
l=NULL, date_breaks = "1 month")+
  scale_color_manual(values=c("red","black"))+
  guides(color=guide_legend("Temperatur"), linetype=guide_legend("Lysimeter"))+
  theme_bw(base_size=12)+

```

```

    theme(axis.text.x=element_text(hjust=c(1),angle=c(45),size=rel(1.5)),
          axis.text.y=element_text(size=rel(1.5)),
          axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
          legend.position="none",
          legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
          legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
          legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
          legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))
nub<-ggplot(data=data_set_fil)+ #####Vergleich Saugsspannungsdaten Exposition Nord Unterboden
  geom_path(aes(x=Date,y=N_h_40, color="HYDRUS"), size=1)+
  geom_path(aes(x=Date,y=N_UB*-1, color="T8"), size=1)+
  annotate("text",size=5,hjust=0, label=paste("RMSE:",err_h_exp$RMSE_N_Ub[1],"hPa"),x=as.POSIX
ct("2018-09-01"),y=-300)+
  scale_y_continuous(limits=c(-350,0), name="Unterboden (hPa)")+
  scale_x_datetime(limits=c(as.POSIXct("2018-09-01"),as.POSIXct("2018-10-31")),name=NULL, labe
l=NULL, date_labels = "%b", date_breaks = "1 month")+
  scale_color_manual(values=c("red","black"))+
  guides(color=guide_legend("Temperatur"), linetype=guide_legend("Lysimeter"))+
  theme_bw(base_size=12)+
  theme(axis.text.x=element_text(hjust=c(1),angle=c(45),size=rel(1.5)),
        axis.text.y=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
        legend.position="none",
        legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
        legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))

oob<- ggplot(data_set_fil)+ #####Vergleich Saugsspannungsdaten Exposition Nord Oberboden
  geom_path(aes(x=Date,y=0_h_20, color="HYDRUS"), size=1)+
  geom_path(aes(x=Date,y=0_Ob*-1, color="T8"), size=1)+
  annotate("text",size=5,hjust=0, label=paste("RMSE:",err_h_exp$RMSE_O_Ob[1],"hPa"),x=as.POSIX
ct("2018-09-01"),y=-600)+
  scale_y_continuous(limits=c(-750,0), name=NULL, labels=NULL)+
  scale_x_datetime(limits=c(as.POSIXct("2018-09-01"),as.POSIXct("2018-10-31")),name=NULL, labe
l=NULL, date_breaks = "1 month")+
  scale_color_manual(values=c("red","black"))+
  guides(color=guide_legend("Temperatur"), linetype=guide_legend("Lysimeter"))+
  theme_bw(base_size=12)+
  theme(axis.text.x=element_text(hjust=c(1),angle=c(45),size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
        legend.position="none",
        legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
        legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))

oub<-ggplot(data=data_set_fil)+ #####Vergleich Saugsspannungsdaten Exposition Nord Unterboden
  geom_path(aes(x=Date,y=0_h_40, color="HYDRUS"), size=1)+
  geom_path(aes(x=Date,y=0_UB*-1, color="T8"), size=1)+
  annotate("text",size=5,hjust=0, label=paste("RMSE:",err_h_exp$RMSE_O_Ub[1],"hPa"),x=as.POSIX
ct("2018-09-01"),y=-300)+
  scale_y_continuous(limits=c(-350,NA), name=NULL, labels=NULL)+
  scale_x_datetime(limits=c(as.POSIXct("2018-09-01"),as.POSIXct("2018-10-31")),name=NULL, date
_labels = "%b", date_breaks = "1 month")+
  scale_color_manual(values=c("red","black"))+
  guides(color=guide_legend("Temperatur"), linetype=guide_legend("Lysimeter"))+
  theme_bw(base_size=12)+
  theme(axis.text.x=element_text(hjust=c(1),angle=c(45),size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
        legend.position="none",
        legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
        legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))

legy<-get_legend(ggplot(data=data_set_fil)+ #####Vergleich Saugsspannungsdaten Exposition Nord
Unterboden
  geom_path(aes(x=Date,y=0_h_40, color="HYDRUS"), size=1)+
  geom_path(aes(x=Date,y=0_UB*-1, color="T8"), size=1)+

```

```

        scale_y_continuous(limits=c(-350,NA), name=NULL, labels=NULL)+
        scale_x_datetime(limits=c(as.POSIXct("2018-09-01"),as.POSIXct("2018-10-31"))
),name=NULL, label=NULL)+
        scale_color_manual(values=c("red","black"))+
        guides(color=guide_legend("Matrixpotential"), linetype=guide_legend("Lysime
ter")))+
        theme_bw(base_size=15)+
        theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
              axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
              legend.position="bottom",
              legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
              legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
              legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
              legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA)) )

# saug1<-plot_grid(nob, oob,nub, oub, nrow=2, rel_widths = c(1.3,1),rel_heights =c(1,1) )
# plot_grid(saug1, legy, nrow=2, rel_heights = c(1,0.1))

```

```

Oet<-data_set_fil %>%
  filter(Date>="2018-09-01"& Date<="2018-11-01")%>%
  ggplot(.)+ ###Vergleich totale Evaporation Exposition
  geom_col(aes(x=Date, y=((O_ETa)),fill="ET", color="ET"),size=0.5)+
  geom_col(aes(x=Date, y=((O_Evap_a)),fill="E", color="E"),size=0.5)+
  scale_y_continuous(name="ET und E (mm)", limits=c(0,6), labels=NULL)+
  scale_x_datetime(name=NULL, labels=NULL, breaks=c(seq.POSIXt(from=start_date, to=end_date, b
y="1 month")))+
  scale_fill_manual(values=c(ET="forestgreen",E="tan4"))+
  scale_color_manual(values=c(ET="forestgreen",E="tan4"))+
  guides(color=guide_legend(""), fill=guide_legend(""))+
  theme_bw(base_size=12)+
  labs(title="Osten")+
  theme(axis.text.y=element_blank(),
        axis.text.x=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_blank(),
        legend.margin=margin(0,0,0,0),
        legend.box.margin=margin(-5,-5,-5,-5),
        legend.position="none",
        legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
        legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))

```

```

Net<-data_set_fil %>%
  filter(Date>="2018-09-01"& Date<="2018-11-01")%>%
  ggplot(.)+ ###Vergleich totale Evaporation Exposition
  geom_col(aes(x=Date, y=((N_ETa)),fill="ET", color="ET"),size=0.5)+
  geom_col(aes(x=Date, y=((N_Evap_a)),fill="E", color="E"),size=0.5)+
  scale_y_continuous(name="ET und E (mm)", limits=c(0,6))+
  scale_x_datetime(name=NULL, labels=NULL, breaks=c(seq.POSIXt(from=start_date, to=end_date, b
y="1 month")))+
  scale_fill_manual(values=c(ET="forestgreen",E="tan4"))+
  scale_color_manual(values=c(ET="forestgreen",E="tan4"))+
  guides(color=guide_legend(""), fill=guide_legend(""))+
  theme_bw(base_size=12)+
  labs(title="Norden")+
  theme(axis.text.y=element_text(size=rel(1.5), margin = margin(t = 0, r = 0, b = 0, l = 23)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
        legend.margin=margin(0,0,0,0),
        legend.box.margin=margin(-5,-5,-5,-5),
        legend.position=c(.5,.9),
        legend.direction="horizontal",
        legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
        legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))

```

```

saug1<-plot_grid(Net, Oet, nob, oob,nub, oub, nrow=3, rel_widths = c(1.3,1),rel_heights =c(1,0.
8,1) )

```

```

expo_plot<-plot_grid(saug1, legy, nrow=2, rel_heights = c(1,0.05))
ggsave(expo_plot, file="expo_plot.jpg", width=10*1.25, height=14*1.25, units="cm", dpi=300)
expo_plot

####Matrixpotenzial Hydrus mitte Juni bis mitte Juli
plot_nodes1<-ggplot(nodes)+
  geom_point(aes(x=log10(Head*-1), y= (Depth), color=factor(format(as.Date(nodes$Date), "%d. %
b"),levels=c("15. Jun","25. Jun","05. Jul","15. Jul"), ordered=T)),size=1)+
  scale_x_continuous(name="pF", breaks=(c(1.5,3,4.2)))+
  scale_y_continuous(name="Tiefe")+
  # scale_color_manual(values="")+
  scale_color_brewer(palette="RdGy", direction=-1)+
  guides(colour=guide_legend("",override.aes=list(alpha=1, size=3)))+
  theme_bw(base_size=15)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
        strip.text.x = element_text(size = rel(1.5)),
        legend.margin=margin(0,0,0,0),
        legend.box.margin=margin(-5,-5,-5,-5),
        legend.position="top",
        legend.direction="horizontal",
        legend.text = element_text(size=rel(1.4)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
        legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA)) +
  facet_wrap(~Modell, nrow=1)

plot_nodes2<-ggplot(nodes)+
  geom_point(aes(x=Flux*10, y= (Depth), color=factor(format(as.Date(nodes$Date), "%d. %b"),lev
els=c("15. Jun","25. Jun","05. Jul","15. Jul"), ordered=T)),size=1)+
  scale_color_brewer(palette="RdGy", direction=-1)+
  scale_y_continuous(name="Tiefe")+
  scale_x_continuous(name="Fluss (mm)")+
  geom_vline(xintercept=0,color="black")+
  theme_bw(base_size=15)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
        strip.text = element_blank(),
        legend.margin=margin(0,0,0,0),
        legend.box.margin=margin(-5,-5,-5,-5),
        legend.position="none",
        legend.text = element_text(size=rel(1.4)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
        legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA)) +
  facet_wrap(~Modell)

plot_nodes<-plot_grid(plot_nodes1,plot_nodes2,ncol=1)
ggsave(plot_nodes, file="plot_nodes.jpg", width=16*1.25, height=16*1.25, units="cm", dpi=300)
plot_nodes

#####Temperaturen Plantcare
t1<-ggplot(data=data_set_fil)+ ####Vergleich Temperatur Exposition Oberboden
  geom_path(aes(x=Date,y=PC_N_10_T_mean, color="Nord"), size=1)+
  geom_path(aes(x=Date,y=PC_O_10_T_mean, color="Ost"), size=1)+
  geom_path(aes(x=Date,y=L1_T8_T_015, color="Lysi (15 cm)"), size=1)+
  scale_y_continuous(name=(paste("°C Oberboden (10 cm)")),limits=c(10,20), breaks=c(10,15,20))
+
  scale_x_datetime(limits=c(as.POSIXct("2018-09-01"),as.POSIXct("2018-10-31")),name=NULL,date_
breaks = "1 month", date_labels = "%b")+
  scale_color_manual(values=c(Nord="dark red",Ost="dark orange", "Lysi (15 cm)"="black"))+
  guides(color=guide_legend("mittlere Bodentemperatur"), linetype=guide_legend("Lysimeter"))+
  theme_bw(base_size=17)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
        legend.position="none",
        legend.margin=margin(0,0,0,0),
        legend.box.margin=margin(-5,-5,-5,-5),

```

```

    legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
    legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
    legend.spacing = unit(0.2, "cm"),
    legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))

t2<-ggplot(data=data_set_fil)+ ####Vergleich Temperatur Exposition Unterboden
  geom_path(aes(x=Date,y=(PC_N_40_T_mean), color="Nord"), size=1)+
  geom_path(aes(x=Date,y=PC_O_40_T_mean, color="Ost"), size=1)+
  geom_path(aes(x=Date,y=L1_T8_T_030, color="Lysi (30 cm)"), size=1)+
  scale_y_continuous(name=(paste("°C Unterboden (40 cm)")),limits=c(10,20), breaks=c(10,15,20)
)+
  scale_x_datetime(limits=c(as.POSIXct("2018-09-01"),as.POSIXct("2018-10-31")),name=NULL, date
_breaks = "1 month", date_labels="%b")+
  scale_color_manual(values=c(Nord="dark red",Ost="dark orange", "Lysi (30 cm)"="black"))+
  guides(color=guide_legend("Temperatur"), linetype=guide_legend("Lysimeter"))+
  theme_bw(base_size=17)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
        legend.position="none",
        legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
        legend.spacing = unit(0.2, "cm"),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))
t_leg<-get_legend(ggplot(data=data_set_fil)+
  geom_path(aes(x=Date,y=PC_N_10_T_mean, color="Nord"), size=1)+
  geom_path(aes(x=Date,y=PC_O_10_T_mean, color="Ost"), size=1)+
  geom_path(aes(x=Date,y=L1_T8_T_030, color="Lysi."), size=1)+
  scale_y_continuous(name=(paste("Oberboden (10 cm)")),limits=c(10,20), brea
ks=c(10,15,20))+
  scale_x_datetime(limits=c(as.POSIXct("2018-09-01"),as.POSIXct("2018-10-31"
)),name=NULL,date_breaks = "1 month", labels = NULL)+
  scale_color_manual(values=c(Nord="dark red",Ost="dark orange", "Lysi."="bl
ack"))+
  guides(color=guide_legend("mittlere Bodentemperatur"), linetype=guide_lege
nd("Lysimeter"))+
  theme_bw(base_size = 17)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
        legend.position="top",
        legend.margin=margin(0,0,0,0),
        legend.box.margin=margin(-5,-5,-5,-5),
        legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
        legend.spacing = unit(0.2, "cm"),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA)) )

temps<-plot_grid(t1,t2, ncol=2,nrow=1)
temps2<-plot_grid(temps, t_leg, nrow=2 , rel_heights = c(1,0.1))
temps2
ggsave(temps2, file="temps.jpg", width=32*1.25, height=16*1.25, units="cm", dpi=300)

####Abbildung Vergleich Meteodaten
abw_nied_plot<-ggplot(cum_nied_ms)+ ##Grafik Vergleich Niederschlagsmengen
  geom_point(aes(x=cum_nied_ag,y=hellmann, shape="AM"), size=3)+
  geom_point(aes(x=cum_nied_ms,y=hellmann, shape="MS"), size=3)+
  geom_text(data=cum_nied_ms[9,],aes(x=cum_nied_ms,y=hellmann,label=(format(time, format="%d.%
b")),vjust=2), size=7)+
  geom_text(data=cum_nied_ms[10,],aes(x=cum_nied_ms,y=hellmann,label=(format(time, format="%d.
%b")),vjust=2, hjust=0.75), size=7)+
  geom_text(data=cum_nied_ms[6,],aes(x=cum_nied_ms,y=hellmann,label=(format(time, format="%d.%
b")),vjust=2), size=7)+
  geom_abline()+
  scale_x_continuous(name="Niederschlag Messstationen MS / AM (mm)")+
  scale_y_continuous(name="Niederschlag Hellmann Regenmesser (mm)")+
  scale_color_manual(values=c("dark red", "dark green"),
                    name=NULL,
                    breaks=c("MS", "AM"))+
  guides(color=guide_legend("Niederschlagsdaten"), linetype=guide_legend("Lysimeter"),shape=gu

```



```

ide_legend("Niederschlagsdaten"))+
  theme_bw(base_size=17)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
        legend.position=c(.2,.9),
        legend.text = element_text(size=rel(1.1)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
        legend.spacing = unit(0.2,"cm"),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))
ggsave(abw_nied_plot, file="abw_nied_plot.jpg", width=16*1.25, height=16*1.25, units="cm", dpi=
300)
abw_nied_plot

```

```

w1<-ggplot(meteo_1d)+ ##Grafik Vergleich Niederschlag
  geom_point(aes(y=rka150d0,x=nied))+ #, color="black"
  geom_abline()+
  scale_x_log10(name="Niederschlag AM (mm)")+
  scale_y_log10(name="Niederschlag MS (mm)")+
  scale_color_continuous()+
  theme_bw(base_size = 13)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)))

```

```

w2<-ggplot(meteo_1d)+ ##Grafik Vergleich Temperatur
  geom_point(aes(y=tre200d0,x=temp_mitt,shape="mittel"), size=2)+
  geom_point(aes(y=tre200dx,x=temp_max,shape="max"), size=2)+
  geom_point(aes(y=tre200dn,x=temp_min,shape="min"), size=2)+
  geom_abline()+
  scale_x_continuous(name="Temperatur AM (°C)")+
  scale_y_continuous(name="Temperatur MS (°C)")+
  scale_shape_discrete()+
  guides(shape=guide_legend(""))+
  theme_bw(base_size = 13)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
        legend.position=c(.2,.8),
        legend.text = element_text(size=rel(1.2)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))

```

```

w3<-ggplot(meteo_1d)+ ##Grafik Vergleich RLF
  geom_point(aes(y=ure200d0,x=rlf_mitt, shape="mittel"), size=2)+
  geom_point(aes(y=ure200dx,x=rlf_max, shape="max"), size=2)+
  geom_point(aes(y=ure200dn,x=rlf_min, shape="min"), size=2)+
  geom_abline()+
  scale_x_continuous(name="rel. Luftfeuchtigkeit AM (%)")+
  scale_y_continuous(name="rel. Luftfeuchtigkeit MS (%)")+
  scale_shape_discrete()+
  guides(shape=guide_legend(""))+
  theme_bw(base_size = 13)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
        legend.position=c(.2,.8),
        legend.text = element_text(size=rel(1.2)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.2)),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))

```

```

w4<-ggplot(meteo_1d)+ ##Grafik Vergleich Globalstrahlung
  geom_point(aes(y=gre000d0,x=glob/24), color="black", size=2)+
  scale_x_continuous(name="Globalstrahlung AM (W/m2)")+
  scale_y_continuous(name="Globalstrahlung MS (W/m2)")+
  geom_abline()+
  theme_bw(base_size = 13)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)))

```

```

meteo_plots<-grid.arrange(w1,w2,w3,w4,ncol=2,nrow=2)

```



```

ggsave(meteo_plots, file="meteo.jpg", width=16*1.25, height=16*1.25, units="cm", dpi=300)
meteo_plots

strahl_stationen<-ggplot(meteo_1d)+
  geom_point(aes(x=glob/24, y=gre000d0, color="Wädenswil Obstbau"),size=2)+
  geom_point(aes(x=glob_Au/24, y=gre000d0, color="Wädenswil Au"),size=2)+
  geom_point(aes(x=glob_Wein/24, y=gre000d0, color="Wädenswil Weinbau"),size=2)+
  scale_x_continuous(name="Globalstrahlung Agrometeo (W/m2)")+
  scale_y_continuous(name="Globalstrahlung MeteoSchweiz (W/m2)")+
  scale_color_manual(values=c("Wädenswil Obstbau"="red","Wädenswil Au"="dark slate grey","Wäde
nswil Weinbau"="dark red" ))+
  guides(color=guide_legend("Station"))+
  theme_bw(base_size=17)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
        legend.position=c(.3,.85),
        legend.text = element_text(size=rel(1.3)),
        legend.title = element_text(size=rel(1.3)),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))
ggsave(strahl_stationen, file="strahlung_stationen.jpg", width=16*1.25, height=16*1.25, units="
cm", dpi=300)
strahl_stationen

#####
##Entwicklung der Grashöhe
#####

gras_m<-gras %>%
  group_by(Date)%>%
  summarize_all(mean)

rects <- data.frame(start=as.POSIXct("2018-05-15"), end=as.POSIXct("2018-08-31"), group=seq_al
ong(as.POSIXct("2018-06-01")))

geom_rect(data=rects, inherit.aes=FALSE, aes(xmin=start, xmax=end, ymin=min(dat$value),
                                              ymax=max(dat$value), group=group), color="transpa
rent", fill="orange", alpha=0.3)

plot_gras<-ggplot(gras)+ ###Grafik Messdaten Grashöhe
  geom_rect(data=rects, inherit.aes=F, aes(xmin=start, xmax=end, ymin=0,
                                           ymax=95, group=group), color="transparent", fill="o
range", alpha=0.3)+
  geom_hline(yintercept = 0, color = "black", size = 1)+
  geom_hline(aes(color="Wurzeltiefe",yintercept = -30), size = 1)+
  geom_point(aes(x=Date, y=N_h, color="Messdaten"), size=2)+
  geom_point(aes(x=Date, y=O_h, color="Messdaten"),size=2)+
  geom_path(data=LAI,aes(x=Date,y=height, color="Grashöhe"), size=1)+

  scale_y_continuous(limits=c(-50,95), name="Grashöhe und Wurzeltiefe (cm)", breaks=c(100,50,0
,-30))+
  scale_x_datetime(name=NULL,
                  limits=c(as.POSIXct("2018-01-01"),as.POSIXct("2018-11-01")),
                  breaks=c(seq.POSIXt(from=as.POSIXct("2018-01-01"), to=as.POSIXct("2018-11-0
1"), by="2 month")),
                  date_labels="%b")+
  scale_color_manual(values=c(Messdaten="black",Grashöhe= "dark green", Wurzeltiefe="brown"),
                    name=NULL)+
  guides(color=guide_legend("Daten",override.aes = list(linetype=c(1,NA,1),shape = c(NA,16,NA)
)),linetype=guide_legend("Daten"))+
  theme_bw(base_size=17)+
  theme(axis.text=element_text(size=rel(1.5)),
        axis.title=element_text(size=rel(1.5)),
        legend.position=c(.15,.8),
        legend.text = element_text(size=rel(1.4)),
        legend.title = element_blank(),
        legend.spacing = unit(0.0,"cm"),
        legend.background = element_rect(colour = NA, fill = NA))
ggsave(plot_gras, file="gras.jpg", width=16*1.25, height=16*1.25, units="cm", dpi=300)
plot_gras

```